



Introduction de critères ergonomiques dans un système de génération automatique d'interfaces de supervision

Julien Rechard

► To cite this version:

Julien Rechard. Introduction de critères ergonomiques dans un système de génération automatique d'interfaces de supervision. Psychologie. Université de Bretagne Sud, 2015. Français. NNT : 2015LORIS380 . tel-01309300

HAL Id: tel-01309300

<https://theses.hal.science/tel-01309300>

Submitted on 6 Jul 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THESE / UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD

Mention : Ergonomie

Présentée par

Julien Rechart

Préparée au Lab-STICC (UMR 6285) et au
CRPCC- Lestic (EA 1285)

Introduction de critères ergonomiques dans un système de génération automatique d'interfaces de supervision

Thèse soutenue le 6 Novembre 2015

devant le jury composé de :

Frédéric Vanderhaegen

Professeur / Université de Valenciennes / Rapporteur

Julien Cegarra

Professeur / Université d'Albi / Rapporteur

Franck Ganier

Professeur / Université de Brest / Examineur

Patrick Girard

Professeur / Université de Poitiers / Examineur

Alain Bignon

Responsable recherche et innovation ouest / SEGULA / Invité

Thierry Morineau

Professeur / Université de Bretagne Sud / Directeur de thèse

Pascal Berruet

Professeur / Université de Bretagne Sud / Co-Directeur de thèse

Remerciements

Je ne peux commencer ce manuscrit sans remercier la longue liste des gens qui ont participé de près ou de loin à cette histoire. Je débiterai donc en remerciant mes trois encadrants, Alain Bignon, Pascal Berruet, Thierry Morineau, sans lesquels cette thèse ne serait pas ce qu'elle est. Mes remerciements se tournent ensuite vers tous les contributeurs de cette thèse qui m'ont aidé à concrétiser ce projet. Je pense tout particulièrement sur les aspects informatiques à Djamal Kesraoui qui a sacrifié un bon nombre d'heures de travail, parfois même des weekends, et je lui suis particulièrement reconnaissant pour cela. Toujours sur cet aspect, je remercie, Landry Rahamefy et Maxime Jeusselin pour leur participation à l'implémentation des travaux. Sur les aspects ergonomiques, cette thèse ne serait pas ce qu'elle est, sans Marion Dubois, Florine Léger et Laurianne Boulhic qui ont très largement contribué à la réussite des expérimentations, à la création du modèle standard d'IHM et aux choix des codages couleurs. Je remercie également Mr Jean-frédéric Bouillon, Mr Didier Métayer ainsi que les deux institutions qu'ils représentent respectivement, l'ENSM de Nantes et le lycée maritime d'Etel sans qui les expérimentations n'auraient pas vu le jour. Je les remercie également pour toutes leurs connaissances qu'ils ont bien voulu partager avec nous.

Je remercie également tous les gens qui m'ont soutenu et accompagné par leur amitiés et leur bonne humeur autour de discussions, d'un verre, de parties de billard, de babyfoot, d'un ballon de basket ou bien encore sur une scène de théâtre. La liste est longue : Erwan Guitton, Alexande Kostenko, Romain Liron, Valère Alibert, Cedric Seguin, Benoit Langard, Samantha Judas, Marie-Aline Hélias, Morgane Deroiné, Laetitia Marrot, Marjolaine Simon, Hoang Van trinh, Amandine Porcher, Fanny Guennoc, Erwan Moréac, Hugues Wouano, Antoine Lemartinel, François Astier, Marine Lan, Sophie Prat, Olga Goulibali, Soraya Kesraoui, MathildeTrehin, Kevin Henry, Cedric Seguin, Benoit Langard...

Et je ne pourrai faire une pléiade de remerciements sans citer Anaele Lefeuvre qui a su me soutenir, m'accompagner et me supporter tous au long de ces années de thèse sur Lorient.

Je remercierais aussi monsieur Frédéric Vanderhaegen et monsieur Julien Cegarra d'avoir bien voulu être rapporteur de cette thèse ainsi que monsieur Franck Ganier et monsieur Patrick Girard d'avoir accepté d'en être les examinateurs.

Enfin je remercie tous les gens que j'ai oublié de citer sans qui c'est trois années à Lorient, n'auraient pas été ce qu'elles ont été, à savoir trois superbes années.

Cette thèse est le fruit d'une collaboration entre l'entreprise Segula Technologies, acteur majeur des métiers de l'ingénierie, le Lab-STICC, pôle de référence en recherche sur les systèmes communicants et le CRPCC, pôle de référence en recherche sur l'ergonomie des systèmes, le traitement de l'information et le comportement.



Segula Technologies
B. P. 50256
56602 Lanester Cedex



Laboratoire des Sciences et Techniques de
l'Information, de la Communication et de la
Connaissance (Lab-STICC) - UMR n° 6285
Université de Bretagne-Sud
Centre de recherche Christiaan Huygens, BP
92116 56321 Lorient cedex, France
www.lab-sticc.fr



Centre de Recherches en Psychologie,
Cognition, Communication (CRPCC) – EA n°
1285
Université de Bretagne-Sud
Campus de Tohannic, 56000 Vannes

"Le visible ouvre nos regards sur l'invisible."

ANAXAGORE (500- 428 av. J.-C.)

Contributions scientifiques

Ce travail a fait l'objet des publications et communications suivantes :

Publication-journaux internationaux :

- ✓ Rechard, J., Bignon, A., Berruet, P., & Morineau, T. (2015). Verification and validation of a work domain analysis with turing machine task analysis. *Applied ergonomics*, 47, 265-273.

Conférence internationale avec comité de lecture :

- ✓ Rechard, J., Léger, F., Kesraoui, D., Bouillon, J-F., Bignon, A., Morineau, T., Berruet, P. (2015). Experimental verification of ecological interface prototype issued by an automated generation tool. In Proceedings of the 2015 Applied human factors and ergonomics, Las Vegas, USA, 26-30 juillet 2015.

Conférence nationale avec comité de lecture :

- ✓ Rechard, J., Bignon, A., Berruet, P., & Morineau, T. (2014, October). Verification and validation of a work domain analysis with Turing machine task analysis. In Proceedings of the 2014 Ergonomie et Informatique Avancée Conference-Design, Ergonomie et IHM: quelle articulation pour la co-conception de l'interaction (pp. 50-57). ACM.

Sommaire

Remerciements	2
Contributions scientifiques	6
Sommaire	7
Listes des figures	9
Listes des tableaux	12
Liste des abbreviations.....	13
Introduction générale.....	14
Chapitre 1 : Etat de l'art	17
1. Anaxagore, un flot de conception automatisé pour la génération d'interface de contrôle commande.....	17
1.1. Présentation	17
1.2. État de l'art sur la formalisation de la conception : La génération automatique d'interfaces	20
1.3. L'analyse ergonomique des interfaces de contrôle commande	23
1.3.1. Les interfaces de contrôle commande de processus	23
1.3.2. L'ergonomie dans la conception des interfaces de contrôle commande	26
1.4. L'approche de conception écologique, une approche éprouvée.....	27
2. Outil théorique et méthodologique pour une conception écologique d'interface	30
2.1. La démarche de conception écologique.....	30
2.1.1. La psychologie écologique au travers l'ingénierie cognitive	30
2.1.2. Approche dyadique vs triadique, la WDA et les principes SRK.	32
2.1.3. Le domaine de travail	34
2.1.4. Une WDA articulée au modèle SRK	43
2.1.5. L'interface : un support intuitif et efficace.....	46
2.2. De la théorie aux choix techniques de conception	52
2.3. Le choix de la représentation	67
3. D'une recherche académique à une implémentation industrielle, ou la difficulté de transformer l'essai.....	70
3.1. Un tour d'horizon des interfaces écologiques.....	71
3.2. De nouvelles perspectives pour la conception écologique d'interface	72
3.2.1. Des interfaces écologiques aux modalités perceptives variées	72
3.2.2. Des interfaces écologiques aux formats d'affichages divers	73
3.2.3. Des capteurs pour chaque information	76
4. Problématique.....	80
Chapitre 2 : Un outil de validation et de vérification formelle des analyses du domaine de travail	83
1. Contexte	84
2. Turing Machine Task Analysis (TMTA).....	86
3. Simulation par TMTA.....	88
3.1. Théorie.....	88
3.2. Cadre d'application	89
3.2.1. Un domaine intentionnel : La conduite automobile	89
3.2.2. Un domaine causal : Système d'eau douce sanitaire à bord d'un navire (EDS).....	93
Chapitre 3 : Intégration des critères ergonomiques dans le flot de conception	101
1. Proposition	102
2. Modification des modèles existants.....	103
2.1.1. Définition	103
2.1.2. Approche de conception	104

2.1.3.	Méthodologie	104
2.1.4.	Résultats	105
2.1.5.	Architecture de l'information	105
2.1.6.	Parcours opérateurs	106
2.1.7.	Fonctionnalités de l'interface	106
2.1.8.	Présentation de l'interface	107
2.2.1.	Parties dynamiques et widgets	108
3.	Intégrations de la démarche écologique dans le flot	112
3.1.1.	Le schéma d'entrée de bas niveau	112
3.1.2.	Le schéma d'entrée de haut niveau	114
3.2.2.	Widget 2 : représentation des processus « transporter »	119
3.2.3.	Widget 3 : représentation de l'association des processus « maintenir et transformer »	120
3.2.4.	Widget 4 : représentation de l'association des processus « additionner »	121
3.2.5.	Widget 4 : représentation des processus « transporter » à 3 variables	121
3.2.6.	Widget 5 : représentation des processus « stocker »	122
3.2.7.	Widget 6 : représentation des processus « échanger »	123
4.	Implémentation	124
5.	Limites et perspectives de la génération automatique par Anaxagore	126
5.1.	Limites	126
5.2.	Perspectives	127
Chapitre 4 : Évaluation ergonomique des interfaces générées		130
1.	Évaluation expérimentale de prototypes générés par Anaxagore	132
1.1.	Définition	132
1.2.	Étude comparative des performances chez des sujets experts	132
1.2.1.	Objectifs et hypothèses	132
1.2.2.	Méthode	132
1.2.3.	Résultats	141
1.3.	Discussion : Interfaces écologiques versus conventionnelles	143
1.4.	Étude comparative du cheminement cognitif	145
1.4.1.	Objectifs et hypothèses	145
1.4.2.	Méthode	147
1.4.3.	Résultats	150
1.5.	Discussion	151
2.	Évaluation heuristique ou évaluation experte de prototypes générées par Anaxagore	155
2.1.	Définition	155
2.2.	Note globale	157
3.	Bilan	157
Conclusion générale et perspectives		159
Références bibliographiques		164
Annexe		175

Listes des figures

Figure 1 : Frégate Lafayette.....	15
Figure 2 : Paquebot de croisière Teremonoa.....	15
Figure 3 : Cycle en V (Bignon, 2012).....	17
Figure 4 : Vanne de régulation deux voix : éléments de la bibliothèque standard Anaxagore 1	18
Figure 5 : Fond d'IHM standard pour Anaxagore version 1	19
Figure 6 : Flot de conception Anaxagore version 1	19
Figure 7 : Exemple d'interface générée par SUPPLE	23
Figure 8 : Approche écologique versus approche cognitiviste (Kim J. Vicente, 1999).....	32
Figure 9 : Modèle triadique (Traduit de l'anglais Bennett & Flach, 2011)	33
Figure 10 : Espace de décomposition/abstraction.....	36
Figure 11 : Relations moyens-fins (Traduit de l'anglais Naikar et al., 2005)	38
Figure 12 : Étape dans la conception d'une ADS.....	39
Figure 13 : Le modèle SRK (Rasmussen, 1986).....	44
Figure 14 : Place de l'interface dans le modèle triadique (Traduit de l'anglais Bennett & Flach, 2011)	46
Figure 15 : Visual momentum (traduit de l'anglais Woods, 1984).....	49
Figure 16 : loi de la gestalt (Bennett & Flach, 2011)	55
Figure 17 : Affichage digital.....	56
Figure 18 : Symbole	57
Figure 19 : Barre graphe (Jamieson et al., 2001).....	57
Figure 20 : La règle ou ligne de graduation.....	57
Figure 21 : La règle avec un intervalle de valeur normale est le point central à surveiller	58
Figure 22 : Diagramme circulaire (Billet et Morineau, 2005).....	58
Figure 23 : Graphique temporel (Jamieson et al, 2007).....	58
Figure 24 : Trace temporelle	59
Figure 25 : Barre graphe reliée (Jamieson & Vicente, 2001).....	59
Figure 26 : Affichage en entonnoir (C. M. Burns & Vicente, 1995)	60
Figure 27 : Règles connectées (Jamieson et al., 2007	60
Figure 28 : Graphique à barres sommatif (Liu et al., 2002a).....	61
Figure 29 : Ligne traductrice (Burns et Al. 2012).....	61
Figure 30 : Rotation de ligne	62
Figure 31 : Diagramme de données de masse (Jamieson et al, 2002)	62
Figure 32 : Nomogramme (Alain Busser)	62
Figure 33 : Nomogramme utilisé dans une interface écologique (Liu et al., 2002a)	62
Figure 34 : Représentation basée sur les principes de la trigonométrie (Kan & Jamieson, 2012).....	63
Figure 35 : Représentation configurationnelles, (McEwen et al., 2014).....	63
Figure 36 : Technique du tunnel temporel (Bennett & Flach, 2011)	64
Figure 37 : Variante du tunnel temporel (D. S. Hall et al., 2012)	65
Figure 38 : Affichage en étoile, (Jamieson, 2007)	65
Figure 39 : Cycle de Rankine (Catherine M. Burns, 2000a).....	66
Figure 40 : Paulsen (Jamieson & Vicente, 2001)	66
Figure 41 : Affichage de type KWU.....	67
Figure 42 : Modèle du schéma fonctionnel pour la conception d'interface (Liu et al., 2002a)	70
Figure 43: fort temporelle et spatiale intégration	74
Figure 44 : interface écologique pour un contrôle de processus chimique (Jamieson, Miller, Ho, & Vicente, 2007)	75
Figure 45 : Interface écologique pour un contrôle de processus chimique (Jamieson et al., 2007)	76
Figure 46 : Flot de conception générique d'une interface écologique (Ham et Al., 2012)	77

Figure 47 : hiérarchie d'abstraction avec information sur l'instrumentation (traduit de l'anglais St-Cyr et al., 2013).....	79
Figure 48 : Processus de conception écologique et problématiques.....	82
Figure 49 : TMTA	86
Figure 50 : Simulation par la méthode TMTA	89
Figure 51 : Système d'eau douce sanitaire.....	94
Figure 52 : Principe de l'osmose inverse	94
Figure 53 : Flot de conception Anaxagore version 2	102
Figure 54 : Architecture de l'information.....	105
Figure 55 : Page synthèse système	106
Figure 56 : Présentation de l'interface	108
Figure 57 : Modèle de la conscience de la situation	109
Figure 58 : Code couleur des widgets écologiques	110
Figure 59 : Codage normalisé versus optimisé.....	111
Figure 60 : Schéma d'entrée de bas niveau	113
Figure 61 : Interface d'entrée de données pour les informations de haut niveau	115
Figure 62 : Architecture de l'information.....	116
Figure 63 : Page N2 1/2	117
Figure 64 : Page N2 2/2	117
Figure 65 : Widget processus : additionner/transformer/maintenir	118
Figure 66 : Widget « Générer » ou « perdre »	119
Figure 67 : Widget "transporter"	120
Figure 68 : Widget "transformer + maintenir"	120
Figure 69 : Widget "additionner"	121
Figure 70 : Widget "transporter".....	122
Figure 71 : Widget « stockage 2 »	123
Figure 72 : Widget "échanger"	123
Figure 73 : Implémentation du flot de conception Anaxagore pour le système EDS	124
Figure 74 : Boîte de dialogue schéma de haut niveau	125
Figure 75 : Liens boîte de dialogue-données sur le widget stockage.....	126
Figure 76 : Interfaces perspectives	129
Figure 77 : Classification usuelle des techniques d'évaluation (Balbo, 94).....	130
Figure 78 : Dispositif expérimental	133
Figure 79 : Scénario 1 en condition conventionnelle.....	134
Figure 80 : fuite eau soute 1 scénario 2	135
Figure 81 : Scénario 2 en condition conventionnelle.....	135
Figure 82 : Scénario 3 en condition écologique écran de bas niveau	136
Figure 83 : Scénario 3 en condition écologique écran de haut niveau	136
Figure 84 : Scénario 4 en condition écologique écran de haut niveau	137
Figure 85 : Scénario 4 en condition écologique écran de bas niveau	137
Figure 86 : Interface traditionnelle	139
Figure 87 : Interface écologique.....	139
Figure 88 : Déroulement de la passation	140
Figure 89 : Score moyen pour chaque scénario	141
Figure 90 : Temps de détection moyen pour chaque scénario	142
Figure 91 : Temps de compréhension	142
Figure 92 : Widget écologique stockage soute 1	144
Figure 93 : Matrice de cheminement cognitive	146
Figure 94 : Exemple de codage.....	148
Figure 95 : Résultats centralité cognitive	150
Figure 96 : Proportion de liens cohérents.....	151
Figure 97 : Proportions de liens descendants	151

Figure 98 : Carte cognitive de l'expert avec les valeurs de probabilité locale en condition EID pour le scénario 3	153
Figure 99 : Carte cognitive de l'expert avec les valeurs de probabilité locale en condition PID pour le scénario 3	153
Figure 100 : Corrélation performance / liens descendants pour les sujets experts	154
Figure 101 : Corrélation performance/liens cohérents pour les sujets experts	154
Figure 102 : Ratio nombre d'évaluateurs, nombres de problèmes d'utilisabilité détectés Nielsen et Landaeur (93)	156
Figure 103 : Travail en équipe et partage d'un domaine de travail commun.....	162

Listes des tableaux

Tableau 1 : Catégorisation des erreurs humaines (Rouse, 1983)	25
Tableau 2 : Normes et guidelines pour une conception ergonomique d'interface de contrôle commande.....	25
Tableau 3: Comparaison nomenclature des fonctions abstraites.....	38
Tableau 4 : Guidelines pour compléter la hiérarchie de décomposition (traduit de l'anglais Naikar et al., 2005).....	39
Tableau 5 : Sources d'information par niveau de HA (traduit de l'anglais Naikar et al., 2005)	40
Tableau 6 : Guidelines pour identifier les données composant une HA (traduit de l'anglais Naikar et al., 2005).....	41
Tableau 7 : Affichage des variables individuelles (traduit de l'anglais Burns & Hajdukiewicz, 2013)...	68
Tableau 8 : Variables multiples (traduit de l'anglais Burns & Hajdukiewicz, 2013)	68
Tableau 9 : représentation liens moyens-fins (traduit de l'anglais Burns & Hajdukiewicz, 2013)	69
Tableau 10: Modalité perceptive (Burns et al., 2011).....	73
Tableau 11 : WDA de la conduite automobile	91
Tableau 12 : Séquence TMTA : scénario un chien qui traverse la route	92
Tableau 13 : Caractéristiques des experts	95
Tableau 14 : Domaine de travail Eau douce sanitaire à bord d'un navire	96
Tableau 15 : déroulement séquence de contamination	97
Tableau 16 : Listes des fonctions primitives (Naikar et al, 2003)	115
Tableau 17 : Caractéristiques des sujets	139
Tableau 18 : Caractéristique des évaluateurs	156
Tableau 19 : Tableau des scores moyens des 4 évaluateurs experts.....	157

Liste des abbreviations

EID	:	Ecological Interface Design
IHM	:	Interface homme-machine
WDA	:	Work Domain Analysis
TMTA	:	Turing Machine Task Analysis
PID	:	Pipe & Instrument Diagram
HA	:	Hiérarchie abstraction

Introduction générale

Le rapprochement des sciences de l'homme et plus particulièrement de l'ergonomie avec l'informatique, dans lequel s'inscrit, cette thèse a fait l'objet, de nombreux travaux ces dernières années. L'ergonomie informatique est devenue un élément incontournable de la conception logiciel et web. Elle peut se définir à travers quatre fonctions principales : la répartition des tâches entre l'homme et la machine, l'extraction et la formalisation de l'expertise, la prédiction des usages et les difficultés concernant la future utilisation du système informatisé et enfin l'évaluation, la vérification et la validation des hypothèses sur l'utilisation et le comportement des utilisateurs (Burkhardt & Sperandio, 2004).

Parallèlement à cela, la conception d'interface est un processus très consommateur en effort et en temps. Plusieurs tentatives ont été proposées pour automatiser tout ou une partie de la conception de ces interfaces. Cette automatisation a été appliquée au domaine du web avec plus ou moins de succès et a ensuite été appliquée au domaine des interfaces de supervision industrielle. La prise en compte de l'ergonomie dans ces systèmes de génération automatique d'interface a été proposée à plusieurs reprises, le plus souvent sous la forme de modèles tâches conventionnels, basés sur une approche centrée utilisateur.

Aucun outil de génération automatique d'interface orienté sur une approche écologique, s'appuyant sur une analyse du domaine de travail n'existe à l'heure actuelle. Ce manque d'aide au concepteur d'interface écologique s'explique en partie par un manque de formalisation des méthodes et outils liés à la démarche de conception écologique d'interface.

Dès les années 80, Borillo, (1984) faisait remarquer que l'informatique est en mesure d'avoir un impact sur les méthodes et les fondements de la connaissance en science de l'homme. Ce constat faisant écho, quelques décennies plus tard, à celui de Burkhardt & Sperandio, (2004) sur la possibilité que l'informatique a à offrir un outillage de plus en plus adapté et une aide aux activités de l'ergonome. Dans ce sens, nous pensons qu'une des clés pour le développement de la conception écologique dans les industries d'aujourd'hui passe par plus de formalisation de la méthodologie de conception écologique et une aide informatisée aux activités de conception de ce type d'interface.

De plus, la conception écologique s'inscrit dans une démarche de conception participative entre des ingénieurs ayant la connaissance technique du système, des décideurs, et des ergonomes. Cette démarche de conception participative implique par conséquent une forte interaction entre différents experts. Pour surmonter cela, une proposition a été faite par Bignon et al (2012). L'outil Anaxagore se veut être un agglomérateur d'outils garantissant la cohérence entre les différents modèles métiers et

favorisant le dialogue entre les différents interlocuteurs métiers, d'un projet d'interface de contrôle commande. Cela nous amène à réfléchir à la possibilité de lier la conception dirigée par le flot de conception Anaxagore et la conception écologique d'interface. Ces travaux viseront donc à répondre aux problèmes de conception d'interface et aux problèmes d'effort liés à la conception d'interfaces écologiques.

Comme fil conducteur tout au long de ce manuscrit et dans le but d'illustrer la génération automatique nous utiliserons comme cadre d'application principal un système d'eau douce sanitaire embarqué à bord d'un navire (EDS), exemple emprunté à Bignon (2012). Ce type de système se retrouve typiquement dans des navires hauturiers tels que les navires militaires de type Frégate (Figure 1), les navires océanographiques tel « Le pourquoi pas », ou encore les paquebots civils tel le Teremoana (Figure 2). Le système d'eau douce sanitaire de ce type de navire doit par exemple être en mesure d'assurer la potabilité de l'eau pour un équipage d'environ 100 hommes.



Figure 1 : Frégate Lafayette



Figure 2 : Paquebot de croisière Teremoana

Le document est organisé de la façon suivante. Outre cette introduction générale, nous présenterons au lecteur dans une première étape bibliographique (Page 17, chapitre 1) quelques références sur la génération automatique d'interface, les caractéristiques d'une conception écologique, les lacunes de cette méthodologie de conception, et les outils à la disposition des concepteurs d'interfaces écologiques. Cette première partie amènera le lecteur à avoir une vue d'ensemble des grands mécanismes qui régissent la conception d'une interface écologique notamment sur la notion de domaine de travail (Page 34) et sur la notion de représentation graphique écologique (Page 55).

La seconde partie détaillera le premier apport de cette thèse, à travers la formalisation d'une méthodologie de vérification d'un domaine de travail (Page 84). Une application de cette vérification sera faite sur un domaine de travail intentionnel, puis sur un domaine de travail causal (le système EDS). Enfin nous terminerons cette partie en introduisant le premier outil issu de ces travaux de formalisation. Cet outil informatique a pour objectif la vérification d'un domaine de travail sur la base d'un scénario d'exploitation.

En prenant appui sur le domaine de travail EDS vérifié, la troisième partie présentera le second apport de cette thèse sur les contributions de l'ergonomie sur le flot de

conception à travers successivement les modifications du flot Anaxagore 1 (Page 102), à travers les apports au flot Anaxagore 1 (Page 112) et enfin l'implémentation du flot Anaxagore 2 (Page 123) sur un exemple basé sur une analyse du domaine de travail d'un système d'eau douce sanitaire embarqué à bord d'un navire.

Fort de ces deux types d'interfaces (conventionnelle et EID) générées à partir d'un modèle d'entrée, la dernière partie s'intéressera à montrer une étude comparative de l'intérêt des EID. Cette nouvelle version du flot de conception Anaxagore se veut favoriser la conception d'interface écologique. La première partie de ce manuscrit aura permis aux lecteurs de prendre note des différentes caractéristiques cognitives et des performances qu'induit une conception écologique. Nous vérifierons expérimentalement la capacité des interfaces écologiques générées automatiquement, à garantir de bonnes performances, dans un premier temps à l'aide de critères comme le temps de résolution de problèmes, et la précisions dans le diagnostic (Page 132) puis dans un second temps à l'aide d'indice cognitif plus précis telle la centralité cognitive, la prédominance de cheminements cohérents et descendants dans la matrice de domaine de travail (Page 145). Enfin nous présenterons une évaluation heuristique des interfaces écologiques générées (Page 155).

Nous concluons ce manuscrit par un rappel de nos apports, ainsi que par des propositions de perspectives.

Chapitre 1 : Etat de l'art

1. Anaxagore, un flot de conception automatisé pour la génération d'interface de contrôle commande

1.1. Présentation

Ce projet de recherche prend sa source dans un questionnement directement constaté sur le terrain et tente d'apporter un ensemble de solutions. L'expérience des équipes du groupe SEGULA Technologies sur des projets d'industrie navale a fait ressortir la complexité de mener à bien un projet de conception de système sociotechnique en respectant les impératifs économiques et de qualité attendue par la maîtrise d'ouvrage. Un système sociotechnique est un système en interaction forte avec l'humain. La conception de grands systèmes sociotechniques comme les navires est une activité complexe qui met en interaction un grand nombre de concepteurs, parfois plus d'une centaine souvent issus d'horizons techniques très variés. Par exemple, la conception d'un navire fait intervenir plusieurs centaines de concepteurs dans des domaines aussi variés que le génie mécanique, le génie électrique, l'automatisme, l'informatique ou l'ergonomie. Chacun de ces concepteurs possède son propre langage, son propre formalisme, autant de sources possibles d'incompréhension et d'erreurs dans un projet de conception.

De ce contexte un double constat s'impose : d'une part de nombreux problèmes apparaissant en fin de projet sont issus de ces incompréhensions entre les différents intervenants tout au long du cycle de vie du projet.

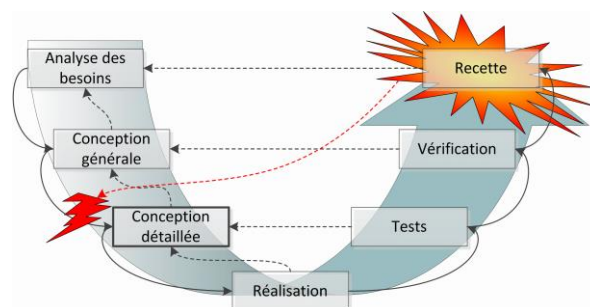


Figure 3 : Cycle en V (Bignon, 2012)

D'autre part, dans un contexte d'amélioration permanente imposée par la concurrence, la diminution des délais et la recherche de qualité de conception ont entraîné l'obsolescence des processus séquentiels (comme le cycle en V Figure 3), au profit de processus itératifs tels que les méthodes de type Agile. L'émergence des processus de conception participative, pour les systèmes en interface avec l'humain, renforce également

la nécessité de prendre en compte des exigences tardives. En d'autres termes, on n'attend plus aujourd'hui que la totalité d'une étape de conception soit validée avant d'entamer la suivante. La conception d'interface de supervision est, par essence un cas d'école. En effet, la définition d'une IHM adaptée nécessite de croiser les connaissances de l'expert en charge de la conception du système piloté, les connaissances de l'expert en charge de la conception technique du système de pilotage, les connaissances de l'expert en charge de la conception ergonomique du système de pilotage, le profil de l'utilisateur ainsi que le contexte d'utilisation.

Ainsi l'objectif du projet Anaxagore est de proposer des méthodes et outils de conception innovants qui garantissent la qualité des produits documentaires et logiciels d'un projet tout en réduisant les coûts de conception et de reconception. La démarche s'appuie sur une approche ascendante utilisant des éléments standardisés pour réaliser le synoptique. Des passerelles entre les différents corps de métier sont alors établies par un jeu de transformation automatique de modèles afin de faciliter les échanges entre les concepteurs, facilitant ainsi le dialogue et la compréhension entre les différents corps de métiers. (Goubali, Bignon, Berruet, Girard, & Guittet, 2014)

Les études menées précédemment par SEGULA Technologies en collaboration avec le Lab-STICC ont abouti à la définition d'une première démarche de conception conjointe de programme de commande et d'interface de supervision (Bignon, 2012).

Ce flot de conception, dans sa première version, générait automatiquement des interfaces proches des interfaces conventionnelles classiques de type PID. L'interface était générée sur la base d'un schéma PID entré par un ingénieur, puis était ensuite générée sur la base d'une librairie standard composée d'éléments (Figure 4) et d'un fond d'IHM standard (Figure 5). Le fond d'IHM standard sert de support aux animations dynamiques comme les représentations de vannes, de tuyaux ou encore de débit. Dans la première version, le fond d'IHM se divisait en 6 zones principales, un bandeau titre contenant le nom du système à superviser (1), un bandeau alarme contenant toutes les alarmes (2), La zone 3 permet de visualiser les commandes de haut niveau (3), un bandeau le plus large contenant les informations à superviser, la représentation du système (4), le bandeau 4 est destiné à recevoir les boutons de commande d'un élément sélectionné dans la zone 4 (5) et enfin un dernier bandeau contenant les menus de navigation entre les interfaces du sous-système du navire (6).



Figure 4 : Vanne de régulation deux voix : éléments de la bibliothèque standard Anaxagore 1

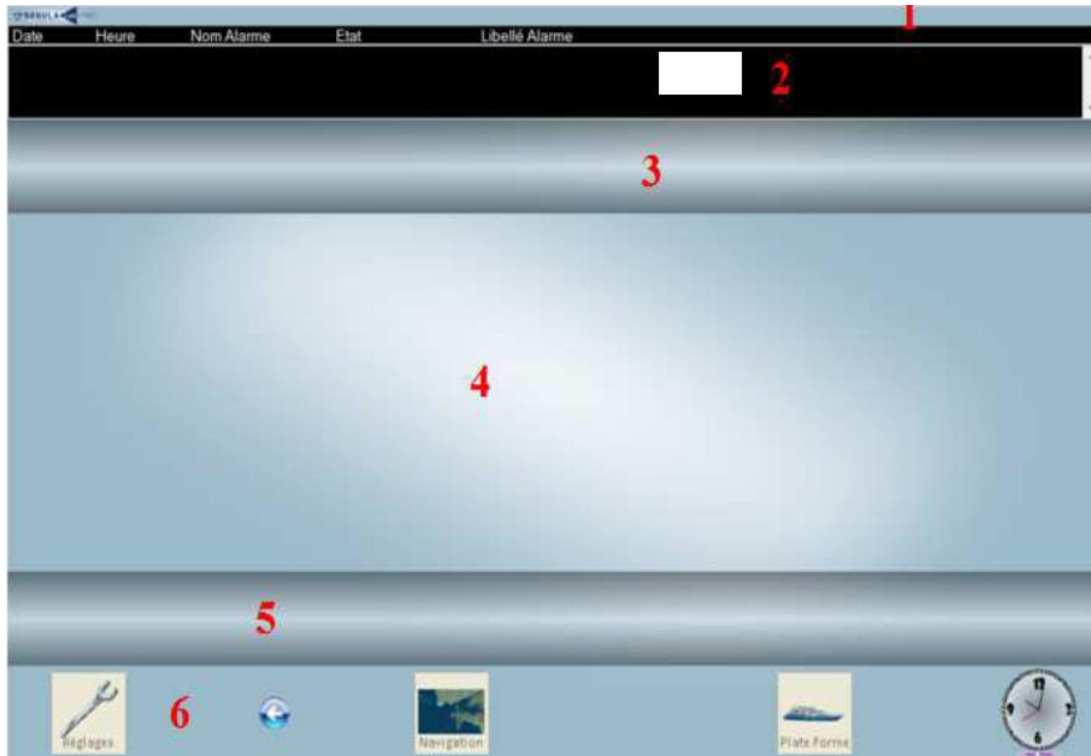


Figure 5 : Fond d'IHM standard pour Anaxagore version 1

La Figure 6 illustre le flot de conception Anaxagore dans sa première version simplifiée.

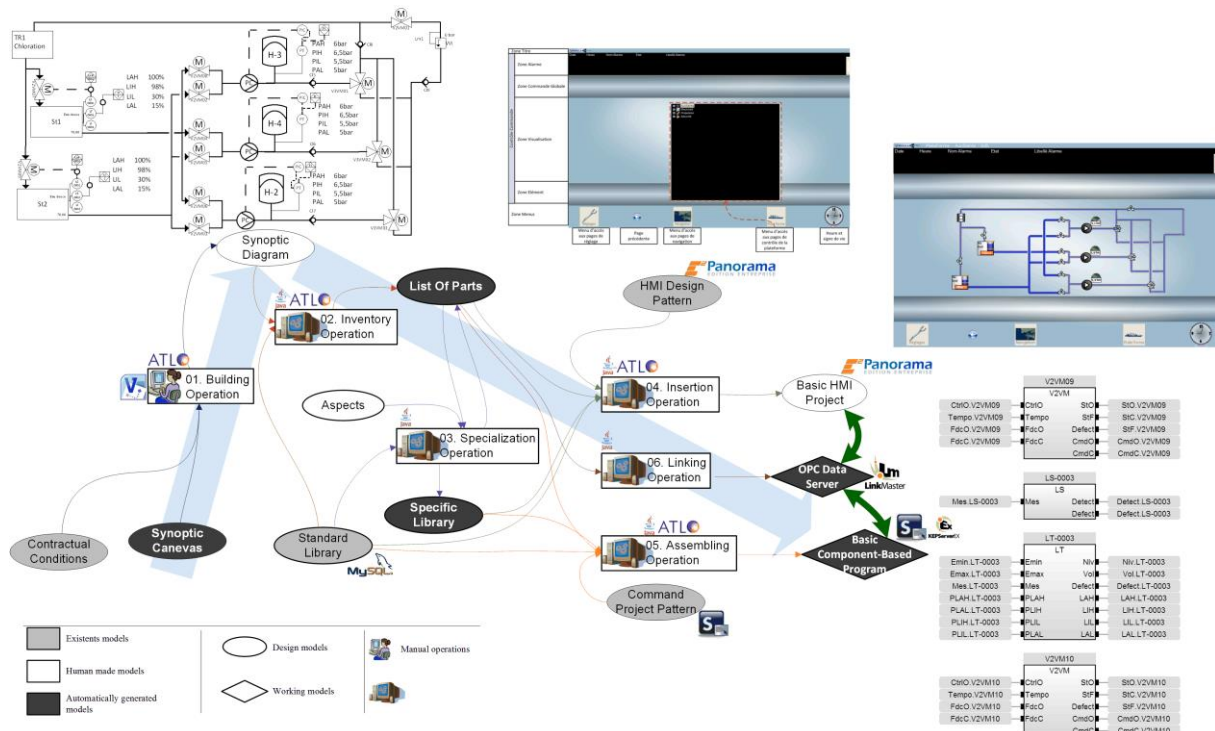


Figure 6 : Flot de conception Anaxagore version 1

La démarche de génération est la suivante (Goubali et al., 2014) :

Grâce aux cahiers des charges et d'une bibliothèque d'éléments standards (Bibliothèque standard), l'expert en charge de la conception du système réalise un schéma

du système à concevoir (Schéma synoptique), cette étape s'appelle l'opération de construction (01). Ensuite l'opération d'Inventaire (02) est une opération automatique d'inventaire basée sur la bibliothèque et sur le synoptique. Cette opération permet de générer une nomenclature (Nomenclature). Puis l'opération de spécialisation (03) déroule un processus d'adaptation, alors que l'opération d'Insertion (04) est l'opération qui permet l'insertion automatique des informations relatives à la supervision issues des vues des éléments dans un modèle standard d'IHM (modèle standard d'IHM), à partir de la nomenclature et des bibliothèques. L'opération d'Assemblage (05) réalise l'assemblage des vues de commande issues des éléments dans un programme élémentaire (Basic Component-Based Program). Enfin, l'opération de Liaison (06) génère un serveur de donnée OPC (OLE for Process Control Data Server) permettant de gérer les échanges entre la supervision et le programme de commande.

Cette première version permet de générer en entière une interface de supervision et un programme de contrôle commande élémentaires à partir d'un schéma PID et des bibliothèques d'éléments.

Néanmoins, bien qu'assurant déjà une bonne cohérence, la démarche actuelle laisse aux concepteurs la charge de l'analyse ergonomique de l'interface produite et de son acceptabilité par l'utilisateur. Forts de ce premier succès entre industrie et académie, nous chercherons à travers cette thèse industrielle à rapprocher de nouvelles connaissances scientifiques et des problématiques industrielles. En effet, d'un côté, la recherche académique sur les démarches de conceptions ergonomiques d'interfaces a permis de proposer des démarches de conception garantissant l'acceptabilité et l'efficacité des interfaces. De l'autre côté, elles souffrent encore de lacunes empêchant leurs intégrations dans un contexte de conception industrielle. Nous chercherons donc à rapprocher et à intégrer ces deux mondes qui par leurs complémentarités, garantissent en sortie des valeurs d'innovation. Nous commencerons par nous pencher sur un concept clé pour rapprocher ces deux approches, celui de la formalisation.

1.2. État de l'art sur la formalisation de la conception : La génération automatique d'interfaces

La formalisation en informatique désigne un mode d'expression plus normalisé et plus précis qu'un langage de tous les jours dit naturel. La formalisation va se caractériser par un ensemble de termes obéissant à des règles logiques strictes (appelées grammaire ou syntaxe) et à une sémantique. La programmation informatique consiste à assembler, à partir d'un modèle de base, les différents objets calculables dont elle a besoin pour représenter une connaissance donnée. Améliorer les « schèmes » de base des formalismes utilisés par l'informatique participe aux progrès de cette discipline.

La démarche de conception Anaxagore cherche justement à proposer une formalisation de la tâche de conception d'une interface de contrôle commande ergonomique. Un seul outil a à notre connaissance, cherché à formaliser la tâche de conception d'interfaces ergonomiques graphiques homme-machine pour le contrôle de procédé industriel, il s'agit d' Ergo-conceptor (Moussa & Kolski, 1992).

1.2.1. Ergo-conceptor : le premier outil précurseur pour la génération automatique des interfaces de contrôle-commande

Ergo-conceptor s'appuie sur la formalisation de la démarche de conception ergonomique d'interfaces de contrôle commande proposé par Millot & Roussillon, (1991). Ergo-conceptor se compose de trois modules principaux. Le premier module décrit un procédé et est guidé par les besoins informationnels des opérateurs. La description se fait selon une décomposition à la fois structurelle et fonctionnelle du procédé, s'inspirant en cela du principe de matrice de domaine de travail (Vicente & Rasmussen, 1992). Le second module permet la génération automatique à partir des résultats du premier module et d'un fichier de spécification comportant des connaissances ergonomiques stockées dans une base de données. Le troisième module permet la génération des vues graphiques. Le concepteur a la possibilité d'éditer les vues graphiques générées sur la base des modules précédents.

Ergo-conceptor permet de générer une interface de contrôle commande rapidement tout en garantissant un formalisme commun entre concepteur informaticien et ergonomiste. Malgré cela, Ergo-conceptor présente plusieurs limites. Lors de la première phase de conception, la description du procédé peut s'avérer fastidieuse, source d'interrogations et d'oublis (Goubali et al., 2014). De même, les interfaces générées par Ergo-conceptor appliquent en partie une démarche de conception écologique d'interface, en reprenant le principe d'une analyse préalable du domaine de travail néanmoins la structure du domaine de travail ne se retrouve pas transfigurée par la suite sur les interfaces générées par Ergoconceptor. De plus le principe de semantic mapping, qui favorise la perception directe de l'information est limité dans son application par le faible nombre de représentations graphiques contenues par Ergoconceptor, la représentation de relations mathématiques complexes devenant vite limitée et le principe de semantic mapping très difficile à appliquer. La démarche de conception écologique ayant montré son intérêt dans la définition des besoins informationnels, mais également dans la manière d'organiser et de représenter les informations à l'écran, une formalisation complète de la démarche semble donc pertinente pour favoriser une efficacité optimale des interfaces générées de manière automatique, ce qui n'est pas le cas à l'heure actuelle avec Ergoconceptor.

1.2.2. La génération automatique d'interfaces pour d'autres types d'interfaces que les interfaces de contrôle-commande

D'autres outils ou démarche de conception orientée vers la génération automatique d'interface ont été proposés au cours des deux dernières décennies : HUMANOID (P. Szekely, Luo, & Neches, 1992), UIDE (Sukaviriya, Foley, & Griffith, 1993), GENIUS (Janssen, Weisbecker, & Ziegler, 1993), TERESA (Paterno, Santoro, Mantyjarvi, Mori, & Sansone, 2008), MASTERMIND (P. A. Szekely, Sukaviriya, Castells, Muthukumarasamy, & Salcher, 1995). Parmi ces projets, le projet TRIDENT (Tool foR an Interactive Developement Environnement) propose une méthodologie basée sur l'approche dirigée par les modèles. TRIDENT permet à partir d'une analyse de la tâche d'aboutir à un prototype d'interface (Bodart, Hennebert, Leheureux, & Vanderdonckt, 1995). Cette méthodologie s'appuie sur une série de formalismes, notamment la formalisation graphique des modèles de tâches. Les prototypes d'interfaces générées par TRIDENT nécessitent une validation finale par un expert des facteurs humains (guidelines, tests utilisateurs...). De plus, TRIDENT ne s'adresse pas spécialement à la génération d'interfaces de contrôle-commande.

Plus récemment, le projet SUPPLE (Gajos, Weld, & Wobbrock, 2010) propose un nouvel outil de génération automatique d'interface qui se distingue des travaux précédents par sa volonté de générer automatiquement des interfaces personnalisées. Les auteurs partent du constat que tous les individus sont différents, qu'il n'existe pas un schéma cognitif unique, ni même que l'environnement d'utilisation est stable et que par conséquent les interfaces actuelles nécessitent le plus souvent des phases de reconception ou un besoin d'assistance technologique pour aider les utilisateurs. SUPPLE se base sur 3 modèles, un modèle de spécification de l'interface, un modèle du support d'affichage qui contient toutes les caractéristiques et limites techniques du support d'utilisation. Enfin SUPPLE contient un modèle des usages dans le but de refléter les différences d'usages que peut présenter l'interface. Ce dernier modèle va permettre d'adapter l'interface aux usages des utilisateurs en enregistrant les traces des séquences effectuées par l'utilisateur sur l'interface. Les auteurs proposent ensuite de comparer les performances réalisées par les utilisateurs via des interfaces générées en fonction des coûts de fonctionnement. Les coûts de fonctionnement correspondent au temps optimal que doit mettre un individu pour réaliser une tâche donnée. La Figure 7 illustre la même interface générée automatiquement pour deux personnes différentes. L'on peut constater les différences dans les préférences des utilisateurs et par conséquent dans les types de représentations graphiques utilisés. L'approche de SUPPLE, considérant qu'il n'existe pas un modèle cognitif pour un individu est intéressant et se rapproche de la philosophie de conception écologique préférant montrer le choix des possibles à l'utilisateur qu'un parcours pré-supposé sur un utilisateur idéal.



Figure 7 : Exemple d'interface générée par SUPPLE

Toutes ces approches de génération automatique à l'instar d'Anaxagore cherchent à favoriser l'intégration le plus rapidement possible dans le cycle de conception de prototype d'interface. Cependant la plupart des travaux de génération automatique d'interface ne s'intéressent pas aux interfaces de système complexe de contrôle commande. Ce type d'interface nécessite une attention toute particulière sur la composante ergonomique. En effet, la complexité des systèmes supervisés peut très vite conduire l'opérateur en supervision en situation d'échec face à des problèmes survenant de manière imprévue et aux conséquences parfois désastreuses (Three Miles Island, Bhopal...).

1.3. L'analyse ergonomique des interfaces de contrôle commande

1.3.1. Les interfaces de contrôle commande de processus

Le flot de conception Anaxagore s'intéresse aux interfaces utilisateurs de salle de contrôle-commande pour des systèmes industriels complexes. La taille de l'espace-problème (le nombre de variables impliquées), le système social, la distribution du système (géographique, des compétences des différents acteurs), le niveau d'automatisation, la dynamique du système (le délai dans les effets des actions menées sur le système), le lien entre les différents sous-systèmes, la fiabilité dans les données disponibles pour l'opérateur, l'observabilité plus ou moins directe de l'évolution du système, sont autant de facteurs contribuant au caractère complexe ou non d'un système (Carayon, 2006). La supervision de processus chimiques, de processus nucléaires, de systèmes de transport (avion, navire, train, automobile...) ou bien encore la supervision médicale sont typiquement des systèmes complexes.

Dans ce type de systèmes, les tâches humaines impliquent des critères de prise de décisions multiples. Les interfaces utilisateurs vont très souvent jouer un rôle capital dans l'efficacité et la sûreté des systèmes homme-machine. Les opérateurs humains peuvent être amenés à résoudre des problèmes impliquant des centaines, voire des milliers de variables (tels que la température, le débit, la pression, l'intensité, etc.). Les tâches humaines nécessitent alors un très haut niveau de connaissance. Il s'agit de savoir comment toutes ces variables sont liées et interagissent ensemble.

Rouse, (1983) a classifié ces tâches humaines pour le contrôle de processus en quatre catégories :

Les tâches de transition : celles-ci correspondent au changement d'état du procédé (arrêt, démarrage, changement de point de fonctionnement). Les outils proposés à l'opérateur doivent alors lui permettre d'effectuer des procédures préétablies, de juger de leurs bonnes répercussions sur le procédé et de surveiller constamment la bonne évolution de celui-ci.

Les tâches de contrôle et de suivi de l'installation : l'opérateur doit pouvoir surveiller l'état du procédé, de façon à détecter et à anticiper l'apparition d'un événement anormal, et optimiser si besoin la production.

Les tâches de détection de défaut et de diagnostic : par l'apparition d'alarmes ou/et la possibilité d'observer une évolution anormale de certaines variables du procédé, l'opérateur doit pouvoir détecter les défauts et effectuer son diagnostic en conséquence. Il est alors nécessaire à l'interface homme-machine de permettre une mise en évidence aisée des relations cause/effet entre les variables du procédé.

Les tâches de compensation ou de correction : afin de rétablir le fonctionnement normal du procédé, l'interface doit aider l'opérateur à décider des actions à accomplir et à visualiser leurs effets sur le procédé.

En plus de ces quatre tâches de base, une cinquième tâche sur la gestion de l'aspect collectif du travail semble émerger (De Keyser et al., 87). Dans certaines situations inhérentes aux tâches citées précédemment l'opérateur doit organiser une distribution optimale des actions dans le temps. Il doit gérer et synchroniser les actions séquentielles et/ou parallèles, effectuées par d'autres intervenants.

Des erreurs dans la conception ou des écrans mal adaptés à l'opérateur peuvent dans le cadre de ce genre de système mener à la catastrophe et à l'échec des opérateurs dans la réalisation des tâches qui leur sont demandées (Exemple : Three Miles Island).

Des écrans mal conçus peuvent engendrer bon nombre d'erreurs, Rouse, (1983) propose une classification des différents types d'erreurs possibles (Tableau 1). Les catégories d'erreurs recouvrent l'ensemble du processus de résolution de problèmes de la détection jusqu'à la mise en place et l'exécution de stratégie.

Tableau 1 : Catégorisation des erreurs humaines (Rouse, 1983)

Catégorie générale	Catégorie spécifique
Observation de l'état du système	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Excessive ▪ Fausse interprétation ▪ Incorrecte ▪ Incomplète ▪ Inappropriée ▪ Absente
Choix d'une hypothèse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Incohérent par rapport à l'observation ▪ Cohérent mais peu probable ▪ Cohérent mais très coûteux ▪ Fonctionnellement non pertinent
Evaluation d'une hypothèse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Incomplète ▪ Acceptation d'une mauvaise hypothèse ▪ Rejet d'une bonne hypothèse ▪ Absence
Définition du but	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Incomplète ▪ Incorrecte ▪ Superflue ▪ Absente
Choix de la procédure	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Incomplet ▪ Incorrect ▪ Superflu ▪ Absent
Exécution	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Opération omise ▪ Opération répétée / Addition d'une opération ▪ Opération d'une séquence ▪ Intervention dans le temps non appropriée ▪ Position de l'opération incorrecte ▪ Exécution incomplète ▪ Action sans rapport et inappropriée

Tableau 2 : Normes et guidelines pour une conception ergonomique d'interface de contrôle commande

Normes, guidelines ou critères	Description
Les normes ISO 11064	Elles cherchent à fournir les principes ergonomiques pour l'évaluation des centres de contrôle
Human factors design standarts (HDFS)	Elles fournissent un ensemble complet de règles et de standards en facteurs humains pour une bonne conception de centre de contrôle. Le chapitre 9 se concentre sur les interfaces hommes-machines et fournit un ensemble de règles ergonomiques générales sur comment concevoir une interface de contrôle.
Human Interface design Review guidelines : Nureg 0700 (O'Hara, 1990)	Cette revue de recommandation fournit un moyen d'évaluer les interfaces homme machine (IHM) en particulier dans le domaine de la supervision nucléaire. Elle s'appuie sur une vision dite cognitiviste de la conception qui recommande de s'appuyer sur les stratégies cognitives et les modèles mentaux employés par les utilisateurs. De plus ce guide fournit un exemple de conception qui se base sur une analyse des tâches conduite très tôt dans le processus de conception
GEDIS guideline (Ponsa & Díaz, 2007)	Ce guide couvre à travers 10 indicateurs la conception des IHM de contrôle de processus. Les indicateurs utilisés sont l'architecture, la distribution, la navigation, la couleur, le texte, statut des supports, valeur des processus, graphiques et tableaux, commande d'entrée de données et enfin les alarmes. L'évaluation par rapport à ces indicateurs peut être faite de manière quantitative ou qualitative à l'aide d'une échelle numérique ou nominale.
ASM consortium guidelines (Bullemer, Vernon Reising, Burns, Hajdukiewicz, & Andrzejewski, 2008)	Ce guide a été conçu par le « Abnormal situation management consortium » qui regroupe plusieurs équipes de recherche industrielle et académique. Il vise à concevoir des IHM plus performantes lors des situations dites anormales. Les situations anormales sont définies par une perturbation non souhaitée du plan de fonctionnement d'un processus industriel ou un incident avec lequel le système de contrôle ne peut se débrouiller. Avec des milliers de variables à contrôler, l'opérateur peut vite être dépassé par la charge d'information, il est donc primordial d'organiser l'information de manière à aider l'opérateur à garder une bonne conscience d'où en est le processus à superviser. Ce guide propose des recommandations favorisant la conscience de la situation des processus supervisés.

1.3.2. L'ergonomie dans la conception des interfaces de contrôle commande

Face à l'ampleur humaine, environnementale, ou économique, qu'une ou une succession d'erreurs peuvent entraîner, s'assurer de la robustesse des interfaces de salle de contrôle commande à garantir une utilisation optimale, semble indispensable. Plusieurs guides de conception ont été proposés pour assurer l'ergonomie dans le processus de conception de ce type d'interface (Tableau 2).

Ces guidelines vont ainsi aider le concepteur à créer une IHM de contrôle de processus en réunissant dans un document de référence les bonnes pratiques et les règles de conception à suivre. L'ensemble de ces recommandations s'inscrit dans un cadre plus théorique dans l'ingénierie de conception d'IHM.

Flach, Tanabe, Monta, Vicente, & Rasmussen, (1998) font ressortir quatre approches principales pour la conception d'interface.

- La première approche est l'approche centrée technologie. Elle se concentre sur les capacités de la technologie, sur quoi la technologie est capable de faire. Tout ce que la technologie peut afficher sera montré à l'opérateur. Dans le cadre de cette approche, il y a un affichage de données pour chaque capteur, placé sur le système. Le risque est une surcharge d'informations dans ce que l'opérateur doit traiter. L'on ne prend pas en compte les capacités limitées de l'individu avec ce type de conception. Dans ce type de concept, les capacités de l'individu ne sont pas prises en compte.
- La deuxième approche présentée par les auteurs est l'approche centrée utilisateur. Elle se centre sur les capacités de l'humain et l'implication de ces limites, sur comment doit être conçu le système. L'objectif principal de cette approche est d'assurer que les demandes provenant d'une nouvelle technologie n'excèdent pas les capacités de traitement de l'information d'un opérateur humain. Ainsi les capacités et les attentes de l'utilisateur sont mises en avant pour la conception de ce type d'interface. La présentation de l'information devra répondre aux attentes de l'utilisateur et aux capacités de l'utilisateur, par exemple l'information devra être en un petit nombre de « chunk » pour ne pas surcharger la mémoire de travail. Le « chunk » est un phénomène cognitif et moyen mnémotechnique consistant à regrouper l'information en paquet formant une entité unique, plus facilement mémorisable en mémoire à court terme, ou au moins autant, qu'un élément simple. Il a pour but de faciliter la mémorisation de plusieurs informations en les organisant en groupes indivisibles (Miller, 1956). Les principes tels que la réponse au stimulus (Fitts & Seeger, 1953), le principe de compatibilité de la proximité (Wickens & Carswell, 1995) sont représentatifs de l'approche centrée utilisateur. L'analyste se basera sur un modèle de fonctionnement supposé de l'individu.
- L'approche centrée contrôle se centre sur le couple superviseur humain- dynamique du système. Dans cette approche, l'humain est vu comme un superviseur de la technologie.

Le système est conçu dans le but de contrôler tant les variables nécessaires pour caractériser la dynamique du système que le temps de réponse des variables. Un des mots clefs dans la conception de l'interface est l'observabilité (de l'état des variables, temps de délai et bruit associé à la mesure). Une des stratégies dans ce type d'approche pour réduire les délais associés avec le traitement de l'information par l'humain va être d'apporter des aides à l'anticipation des états futurs de variables du système.

- Enfin la dernière approche présentée par les auteurs et défendue par ces derniers comme la plus pertinente dans la conception d'interfaces est l'approche écologique ou aussi appelée l'approche centrée utilisation. Elle est l'approche qui diverge le plus des trois approches précédentes en ne portant son focus non plus sur un duo homme-système, mais sur une triade composée de l'homme, du système et du domaine de travail. Les trois premières approches définissent le système par rapport à sa structure (homme-machine) tandis que l'approche écologique va définir le système par rapport à sa fonction à l'intérieur d'un plus large espace de travail. Cette approche fera donc appel à une analyse du domaine de travail et des outils pour représenter ce domaine de travail sur l'interface. Flach, Tanabe, Monta, Vicente, & Rasmussen, (1998) positionnent l'approche écologique au regard de ces différentes approches et démontrent l'importance de repositionner la problématique sur le domaine sur lequel s'applique le travail. Les autres approches ne peuvent pas répondre de manière adéquate aux questions de ce qu'est la bonne information, quel est le bon moment et quelle est la bonne manière d'afficher l'information, car l'analyse n'est pas assez profonde et ne permet pas de suivre un modèle si normatif comme pour l'approche centrée utilisateur.

1.4. L'approche de conception écologique, une approche éprouvée

Les interfaces écologiques (Ecological Interface Design – EID) ont démontré leur efficacité et qualité par rapport aux interfaces de supervision traditionnelles basées sur l'utilisation d'un schéma de présentation classique de type P&ID (Pipe and Instrument Diagram). L'utilisation de P&ID comme support à la conception d'interfaces présente plusieurs limites parmi lesquels l'absence d'informations de dites de « hauts niveaux d'abstraction » à savoir les informations sur les objectifs du système ou sur les lois qui le régissent, la difficulté pour l'opérateur de se représenter et garder en mémoire les relations entre les différentes informations et le format d'affichage qui est conçu sans prendre en considération les caractéristiques de l'opérateur (Liu, Nakata, & Furuta, 2002a).

Dans le cadre de la conception d'une interface pour le contrôle d'un processus thermo-hydraulique appelé DURESS, Vicente, Christoffersen, & Perekhita, (1995) développent deux interfaces, une basée sur les interfaces conventionnelles (P&ID) et une seconde intégrant des informations de haut niveau, basés sur le principe de conception écologique. Les résultats montrent que les experts utilisant les EID sont significativement

plus performants que ceux utilisant les interfaces conventionnelles, en particulier lors de la survenue de problèmes non anticipés par les concepteurs et non familiers à l'expert. De même, l'expert est plus rapide et plus précis dans la détection et le diagnostic d'erreurs avec l'interface écologique et possède un meilleur savoir déclaratif sur les propriétés fonctionnelles du système. Les interfaces écologiques montrent ici un véritable potentiel face à la variabilité des situations tout particulièrement face aux scénarios non anticipés par les concepteurs et non familiers aux opérateurs. En effet comme pour tout système complexe, il est impossible d'anticiper tous les cas de figure possibles que ce soit lors de la conception du système par les concepteurs où lors de la formation des opérateurs. De même, face à des tâches anticipées ou familières et lors du contrôle de processus normaux, les interfaces écologiques semblent supportées au moins aussi bien que les interfaces non écologiques, l'opérateur (Christoffersen, Hunter, & Vicente, 1996). Elles semblent montrer également une variabilité moindre en situation normale des performances obtenues par les opérateurs. En effet les sujets utilisant les interfaces écologiques se concentrent sur les objectifs de plus haut niveau pour effectuer la tâche demandée alors que les sujets utilisant les interfaces classiques se basent sur des procédures toutes faites. Le résultat a été que sur la vingtaine de tâches proposées aux sujets, les performances étaient moins dispersées en condition écologique qu'en condition classique (Yu, Lau, Vicente, & Carter, 1998).

De manière générale, l'intégration d'informations de haut niveau dans une interface quelle que soit la modalité de présentation (graphique en barre ou représentation en configuration) semble améliorer les performances des opérateurs face à une anomalie dans le processus et ceux-ci tout particulièrement lorsque l'opérateur est confronté à des scénarios non familiers et non anticipés par le concepteur (Ham & Yoon, 2001). On retrouve des résultats similaires dans plusieurs évaluations empiriques d'interfaces écologiques et ceux-ci dans des contextes industriels divers et variés. Par exemple, dans le domaine nucléaire, Lau, Jamieson, Skraaning, & Burns, (2008) ont développé trois types d'interfaces (une interface traditionnelle, une interface écologique et une interface traditionnelle améliorée qui s'articule toujours autour d'une représentation de type P&ID avec en plus des graphiques présentant des informations de haut niveau). Ces interfaces sont destinées à un système de réacteur à eau bouillante de 1200 MW. Elles sont testées auprès de 6 opérateurs experts. Chaque sujet était confronté à tous les types d'interface et passait un ensemble de 6 scénarios qui comprenait 3 scénarios basés sur les connaissances et 3 articulés sur les procédures. Les scénarios basés sur les connaissances correspondent aux scénarios en liens avec le savoir des opérateurs, impliquant fortement l'activation de connaissances sur le fonctionnement du système. A contrario les scénarios basés sur les procédures correspondent aux scénarios reposant sur des problèmes déjà rencontrés pour lesquels l'opérateur possède des solutions types. Chaque scénario était divisé en deux phases, une phase appelée phase de détection correspondant au laps de temps avant la première alarme et une phase de résolution après l'apparition de la première alarme. Deux éléments étaient

mesurés : la charge de travail et la capacité des opérateurs à réaliser leurs tâches en accord avec les solutions idéales prescrites, pour chaque scénario, par un collège d'experts.

Les résultats de cette expérience montrent une charge de travail plus faible pour les interfaces écologiques et les interfaces traditionnelles améliorées en particulier dans la phase de détection et lors des scénarios basés sur les connaissances. Ce qui va dans le sens d'autres études montrant que globalement les interfaces écologiques sont plus efficaces dans les scénarios non anticipés pour lesquelles des procédures n'existent pas (Burns et al., 2008). Enfin les auteurs montrent que les interfaces écologiques semblent améliorer la conscience de la situation en particulier pour les scénarios non basés sur des procédures, ce qui est en accord avec les résultats de Burns et al., (2008). Les interfaces écologiques semblent également soutenir la capacité à travailler en équipe. La charge de travail des opérateurs est plus faible face à une situation de détections de fautes en présence d'une interface écologique (Garabet & Burns, 2004).

Autre secteur, autre exemple, une interface écologique pour la surveillance de trouble cardiovasculaire a été développée par McEwen, Flach, & Elder, (2014). L'objectif de l'interface était d'inciter les utilisateurs à contrôler plus régulièrement leur potentiel risque de faire un infarctus du myocarde. Ils ont évalué la tendance des utilisateurs de l'interface écologique face à ceux ne l'utilisant pas à se conformer à des recommandations pour conserver une bonne santé cardiaque. Ils se sont aperçus que les patients utilisant les interfaces écologiques se conformaient plus à ces recommandations que ceux n'utilisant pas les interfaces écologiques.

Dans le domaine du contrôle-commande militaire, Hall, Shattuck, & Bennett, (2012) ont testé une interface écologique de contrôle-commande pour l'élaboration de stratégies. Les scores de performances sont là encore clairement en la faveur d'une conception écologique d'interface. De même, la charge de travail des opérateurs est plus basse pour les utilisateurs d'interfaces écologiques que ceux d'interfaces standards.

Le choix d'une conception écologique pour assurer la robustesse des interfaces produites par Anaxagore semble intéressant au vu des résultats sur la performance et la conscience de la situation exposés précédemment. Cependant, bien que de plus en plus formalisée, la méthode de conception écologique demande encore des efforts de recherche pour une intégration optimale dans des démarches de conception plus larges telle que celle du projet Anaxagore. Dans une seconde partie théorique nous exposerons ce qu'est une interface écologique et quels sont les principes théoriques fondateurs et généraux qui composent cette approche. Nous aborderons également la question des outils méthodologiques existants qui aident le concepteur à réaliser une interface écologique.

2. Outil théorique et méthodologique pour une conception écologique d'interface

2.1. La démarche de conception écologique

2.1.1. *La psychologie écologique au travers l'ingénierie cognitive*

a. La psychologie écologique selon Gibson

La psychologie écologique est née des travaux du psychologue américain James Gibson (1904-1979) qui proposa une théorie écologique de la perception (Gibson, 1972). Selon Gibson, (1992), la perception ne peut être expliquée que par la relation de l'organisme vivant avec son environnement, d'où le nom d'approche écologique. Gibson, (1992) va proposer deux concepts clés qui vont caractériser son approche : l'affordance et la perception directe. Alors que dans le cognitivisme la perception est assimilée à un traitement réalisé par le cerveau sur une représentation mentale en relation avec l'image rétinienne, dans l'approche écologique, les affordances sont perçues directement, sans passer par une représentation intermédiaire (Blanche, 2010). L'information, ou plus justement la stimulation-information ne sont ni une propriété de l'animal ni une propriété de l'environnement. Elle est ce que l'animal par sa présence, son action fait émerger de l'environnement et qu'il saisit.

Le stimulus est défini traditionnellement comme l'intensité de l'énergie suffisante produisant l'excitabilité du récepteur et la décharge de potentiels d'action au niveau de la fibre nerveuse afférente. L'idée selon laquelle c'est la stimulation des récepteurs (stimulation-énergie ou stimulus) qui est à la base de la perception est rejetée. Par contre, c'est la structure des configurations énergétiques ambiantes (optique, mécanique, acoustique) qui stimule les récepteurs (visuels, vestibulaires, auditifs) et qui fournit l'information pour la perception (stimulation-information). C'est la richesse de la structure spatio-temporelle de l'énergie et non l'intensité suffisante d'une énergie donnée qui est le point de départ du processus perceptif dans la pensée écologique (Luyat & Regia-Corte, 2009).

Le concept d'affordance est défini par Gibson comme une donnée invariante de l'environnement qu'elle soit perçue ou non et qui n'existe qu'en rapport à l'animal. L'environnement constituant ainsi une vaste collection d'opportunités pour l'action (les affordances) que l'animal doit détecter pour le « meilleur ou le pire ». Les affordances sont des propriétés matérielles d'un environnement, il existe donc des paramètres mesurables de l'environnement de l'individu qui étayent les intentions et les actions de ce dernier. Mais, elles n'ont pas d'existence indépendamment de la considération de l'individu conjointement à son environnement de vie.

D'un point de vue écologique, les activités de l'individu sont accomplies en fonction des contraintes résultant d'une interaction entre les capacités de l'humain et les propriétés de l'environnement dans lequel baigne l'individu (Zaff, 1995). Pour comprendre les activités de l'individu et pour concevoir des instruments répondant aux besoins, il est donc nécessaire de comprendre la façon dont les capacités individuelles interagissent avec l'environnement. Toujours d'un point de vue écologique, l'individu et son environnement sont envisagés comme un duo inséparable, au sens où ils ne peuvent être définis, ni même compris indépendamment l'un de l'autre (Gibson, 1992). Ce concept d'interdépendance organisme-environnement (mutualisme) est un des principes fondamentaux de l'approche écologique de la perception et de l'action de Gibson. Ce principe a des implications dans le processus de conception, car il nous amène à envisager l'écosystème, composé de l'opérateur et son environnement de travail, comme première unité d'analyse. Ainsi en regard des activités de l'individu, l'écosystème est défini par la somme de tout ce qui est possible à l'intérieur de cet environnement ou comme Gibson, (1992) le décrit, l'écosystème est du point de vue de l'individu un ensemble d'affordances.

Le second grand concept développé autour de la psychologie écologique est la perception directe. Partant du principe écologique disant que toute affordance est perçue sans traitement préalable ou inférence intermédiaire alors toute affordance fait l'objet d'une perception directe.

Zaff (1995) précise que la perception des affordances et plus précisément leur perception visuelle nécessite de satisfaire plusieurs conditions. La première est l'existence de relations particulières entre un ensemble de propriétés de l'environnement prises comme références pour un ensemble de capacités d'action de l'individu. La deuxième est que l'individu doit être sensible à la structure du champ optique et doit en mesure d'en percevoir les caractéristiques. La troisième est que la relation entre l'individu et son environnement doit être envisagée à travers un éventail des possibles en fonctions des affordances disponibles et compatibles avec ces intentions. Ainsi l'opérateur ne pourra effectuer toutes les actions possibles, car il sera contraint par les affordances disponibles et présentes dans son environnement au moment de l'action.

b. L'ingénierie cognitive

L'ingénierie cognitive tire son essence de la psychologie écologique. Elle se situe à l'intersection de la psychologie, de l'ergonomie et de l'ingénierie. Elle a pour objectif originel de concevoir des systèmes techniques adaptés à la fois aux opérateurs, à leurs modes de traitement de l'information et aux contraintes relatives aux objets sur lesquels les opérateurs doivent effectuer des transformations, ce qui est appelé le domaine de travail. Vicente & Rasmussen, (1990) ont contribué à faire émerger l'ingénierie cognitive. Ils se sont inspirés des travaux de Gibson en se référant aux concepts d'affordance et de perception directe. Vicente & Rasmussen, (1992) émettent l'hypothèse que dans toute situation

naturelle, un grand nombre d'affordances sont disponibles pour chaque individu. Ces affordances sont structurées et les structures d'affordances peuvent véhiculer des informations pertinentes par rapport à un objectif. La hiérarchie moyens-fins que Vicente et Rasmussen proposent, est une sorte de cartographie d'affordances pour un environnement en particulier. Les niveaux d'abstractions proposés par Vicente et Rasmussen permettent de présenter de manières objectives les différents niveaux d'abstractions à travers lesquels l'individu peut percevoir son environnement. Ces travaux ont donné naissance à un courant de l'ingénierie cognitive appelé la conception d'interface écologique (Blanche, 2010).

2.1.2. Approche dyadique vs triadique, la WDA et les principes SRK.

L'analyse du travail est une pratique communément admise dans la communauté des facteurs humains et de l'ergonomie et tout particulièrement de l'ingénierie cognitive néanmoins l'analyse du travail n'est pas abordée de la même manière. On peut diviser l'analyse du travail par deux sous-ensembles de contraintes, les contraintes cognitives et les contraintes de l'environnement. Les contraintes cognitives sont les demandes du travail qui proviennent du système cognitif humain, tandis que les contraintes de l'environnement sont celles qui prennent leurs origines dans le contexte dans lequel l'opérateur se situe. Par exemple, les réalités physiques et sociales dans lequel se retrouve l'opérateur contraignent les comportements de l'opérateur et sont donc des contraintes de l'environnement, car elles existent indépendamment de ce que l'opérateur raisonne. Pour illustrer, les lois physiques qui régissent le système technique d'une centrale technique sont des contraintes liées à l'environnement (Vicente, 1999).

Ces deux sous-ensembles de contraintes forment des exigences de travail pour l'opérateur et devraient donc se retrouver dans une analyse du travail. Dans l'approche traditionnelle cognitiviste, le focus et le point de départ de l'analyse débutent par les modèles mentaux, stratégies et préférences de l'opérateur. Tandis que dans l'approche écologique la réalité physique et sociale sert de socle de départ à l'analyse (Figure 8).

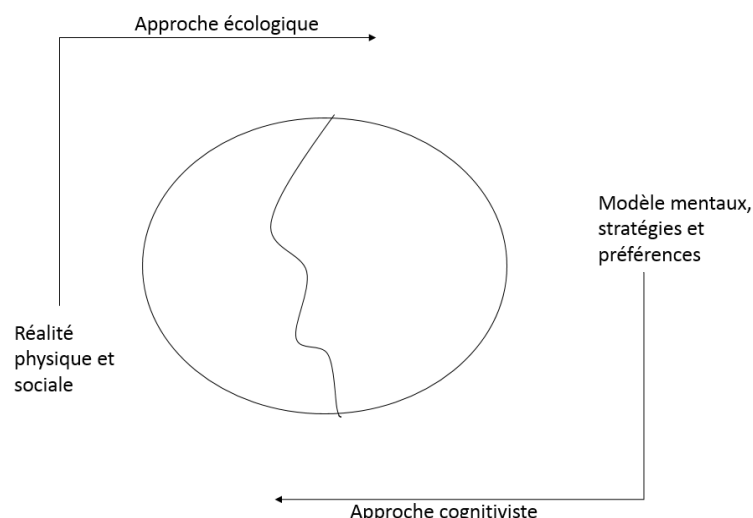


Figure 8 : Approche écologique versus approche cognitiviste (Kim J. Vicente, 1999)

Dans une approche cognitiviste (comme la conception centrée utilisateur), on examinera les modèles mentaux de l'opérateur par rapport au domaine puis on concevra une interface homme-machine compatible avec ce modèle. L'approche écologique n'écarte pas le besoin de prendre en considérations les modèles mentaux de l'opérateur, mais part de l'analyse des contraintes de l'environnement. On se retrouve alors dans une situation à trois acteurs, l'environnement, l'opérateur humain et le médium de représentation (l'interface). Bennett & Flach, (2011) qualifient cette approche de triadique en opposition à l'approche de conception centrée utilisateur qui est une approche dyadique (homme-machine). L'approche de conception triadique est dirigée par le problème. La Figure 9 illustre les buts de cette approche triadique, à savoir d'intégrer les contraintes du domaine de travail, agir sur les compétences de perception et d'action de l'opérateur humain, et utiliser à bon escient les technologies d'affichage de l'information. Le succès ou l'échec d'une interface va se situer dans la capacité d'interaction entre les trois composants de la triade. Chacun des éléments de la triade imposant des contraintes qui vont jouer sur l'efficacité de l'interaction.

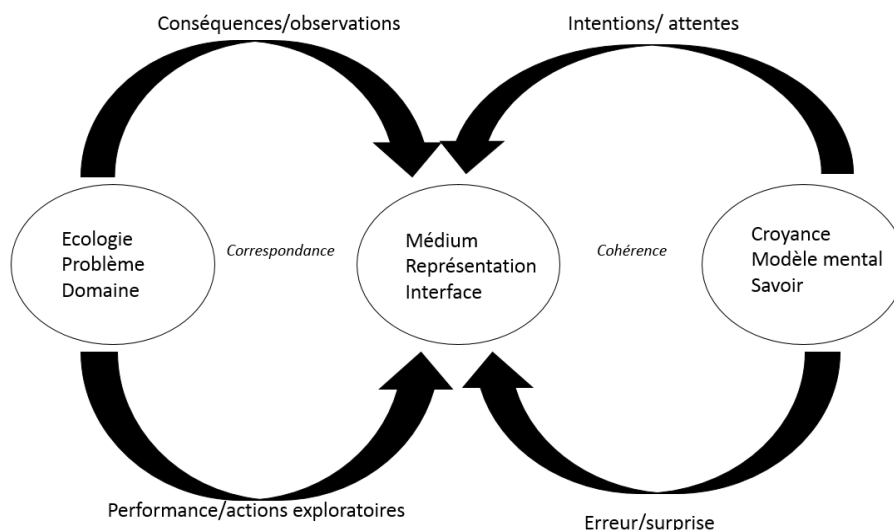


Figure 9 : Modèle triadique (Traduit de l'anglais Bennett & Flach, 2011)

Le cas de l'accident nucléaire de Three Miles Island (Rubinstein, 1979) est un excellent exemple pour montrer l'importance d'une bonne conception. Elle montre également les limites de l'approche cognitiviste. En effet, l'approche cognitiviste va mettre en avant le besoin de suivre et de respecter le modèle mental de l'opérateur. Or, si le modèle mental de l'opérateur est incomplet, voir erroné les conséquences peuvent être catastrophiques. C'est ce qui s'est justement passé lors de l'accident de Three Miles Island. Les opérateurs ayant un modèle mental erroné du processus ont cru que comme la pression était élevée il y avait trop de liquide dans le circuit primaire et ils ont donc cherché à éteindre le système alors qu'il ne le fallait pas. Les concepteurs se sont appuyés sur les modèles mentaux des opérateurs et ont donc conçu l'interface de supervision en renforçant une idée préconçue erronée de la part des opérateurs, celle considérant que le niveau de

pression est toujours une indication valide du niveau d'eau présent dans la boucle de refroidissement primaire.

Vicente, (1999) nous donne un très bon second exemple. Lors de la conception d'une salle de contrôle, le choix d'une conception centrée utilisateur avait été acté. Un opérateur qualifié comme très expérimenté avait participé au choix de conception de cette salle. Mais lorsque la conception fut finie et que cette salle de contrôle fut montrée à d'autres opérateurs, les autres opérateurs trouvèrent les choix de conception mauvais. Cet exemple souligne ainsi la difficulté d'avoir un modèle mental qui puisse convenir à tous les opérateurs. De plus, il souligne que le modèle mental d'un opérateur est parfois incomplet voir erroné et que s'appuyer uniquement sur ce modèle peut être dommageable.

Ainsi il semble primordial de s'assurer que l'opérateur est une description complète de son environnement à travers une bonne analyse du domaine de travail.

2.1.3. Le domaine de travail

Nous venons de voir l'importance de prendre en considération l'environnement, l'opérateur humain et l'interface. Nous examinerons par la suite dans le détail chacun des éléments constitutifs de cette triade et commencerons par celui qui doit initier une analyse du travail, l'environnement.

a. Définition

L'analyse de l'environnement de travail est qualifiée dans la littérature d'analyse du domaine de travail, en Anglais : Work Domain Analysis (WDA). L'objectif de la WDA est de modéliser les contraintes relatives aux objectifs et aux contextes physiques sur lequel l'opérateur agit (Naikar, Hopcroft, & Moylan, 2005).

Un système sur lequel un opérateur agit impose des contraintes propres aux objectifs constitutifs de ce système. Il impose aussi des valeurs et des priorités devant être satisfaites et des fonctions que le système doit réaliser. L'environnement physique impose également à l'opérateur les contraintes liées aux objets physiques qui sont disponibles dans le système de travail ainsi que les capacités et limites fonctionnelles des objets physiques du système. Cet ensemble de contraintes va définir un espace-problème dans lequel l'opérateur possède plusieurs possibilités d'actions.

Il est important de considérer chaque contrainte du domaine de travail comme une catégorie et non comme une instance (Rasmussen, Pejtersen, & Goodstein, 1994). Ainsi quand on évoquera les contraintes au niveau des mesures et priorités, on parlera de catégorie de mesures. Par exemple le débit est une catégorie, tandis que 7 l/h sera son instance. On produit avec la WDA une vision générale du domaine de travail.

Le domaine de travail est indépendant des événements, ce qui signifie que, quelles que soient les situations anticipées ou non anticipées, les catégories de contraintes seront

pertinentes (Vicente, 1999). Ainsi le domaine de travail pourra servir de base pour explorer les différentes manières de résoudre un problème afférant à ce domaine.

Les contraintes d'un système peuvent être causales ou intentionnelles (Vicente, 1999). Les contraintes causales sont basées sur les lois de la physique (exemple : loi de la thermodynamique). Les contraintes intentionnelles sont basées sur les lois sociales, les conventions, les règles formelles ou informelles ou encore les valeurs morales. La plupart des systèmes techniques (centrale nucléaire, navire, avion) sont des systèmes causaux, car leurs comportements peuvent être prédits par les lois de la nature. Tandis que la majorité des systèmes sociaux sont intentionnels (exemple : fonctionnement d'un hôpital), car leurs comportements est là prédit par des conventions, des lois sociales et des valeurs.

b. Analyse du domaine et analyse de la tâche

L'analyse du domaine de travail et l'analyse de la tâche peuvent être considérés soit comme des approches distinctes et en compétition pour aborder une situation de travail, soit comme des approches complémentaires, en articulation. Dans une optique classique, l'analyse de la tâche est primordiale. Elle ne nécessite pas d'analyse du domaine. Une méthode comme Hierarchical Task Analysis (HTA) permet de définir les séquences de buts et sous-buts par lesquelles peut doit passer un opérateur durant la réalisation de la tâche. Cette séquence définira les cheminements via les IHM. Dans ce contexte, Miller & Vicente (2001) ont proposé un comparatif entre l'utilisation de HTA et de l'analyse du domaine de travail. Ils montrent que chaque méthode présente des apports spécifiques, mais que l'analyse du domaine permet de couvrir un champ de cheminements possibles plus larges que la méthode HTA d'analyse de la tâche. Cet avantage permet de mieux cerner des situations non-routinières de travail.

Une autre optique sur l'analyse de la tâche est celle proposée par l'approche écologique. Dans le schéma d'analyse du travail globale proposée par Vicente (1999), appelé Cognitive Work Analysis (CWA), l'analyse de la tâche vient comme une seconde étape dans l'analyse du travail, après l'analyse du domaine. Tandis que l'analyse du domaine circonscrit l'ensemble des contraintes écologiques dans lequel l'opérateur doit pouvoir potentiellement cheminer pour réaliser son travail, l'analyse de la tâche permet de préciser les affordances du domaine qu'il va devoir utiliser dans le cadre de la mise en œuvre de séquences d'actions. Autrement dit, tandis que l'analyse du domaine décrit le « quoi » sur lequel travaille l'opérateur, l'analyse écologique de la tâche définit le « comment ». Mais, à la différence de l'analyse de la tâche classique, ce « comment » n'est pas forcément celui défini de manière normative dans les procédures, dans les tâches prescrites. Les séquences d'actions examinées par l'analyse écologique sont celles qui répondent logiquement et potentiellement aux exigences liées à la mise en séquence des affordances du domaine à travers des traitements perceptifs et la mise en œuvre de schémas d'actions. Sur cette base

et après-coup, l'analyse écologique de la tâche peut servir à concevoir des procédures et des tâches prescrites.

Cette approche écologique de la tâche est celle proposée par Morineau, Frénod, Blanche & Tobin (2009) à travers la méthode « Turing Machine Task Analysis » (TMTA).

La méthode d'analyse de la tâche TMTA n'est pas orientée par des séquences « buts /sous-butts » posées à priori, mais est dirigée par les affordances perçues dans le domaine par l'opérateur, dans le contexte d'un scénario de travail. Cette approche permet de réunir dans une analyse le support nécessaire pour gérer des événements familiers et anticipés et également être support pour des événements non anticipés et non familiers.

Ainsi, l'analyse du domaine de travail ne se suffit pas en elle-même elle doit être complétée par un autre outil dont l'objectif est de définir le quand et comment du besoin informationnel. Kim, Suh, Jang, Hong, & Park, (2012) concluent en mettant en avant le besoin d'un modèle de tâche en mesure de combler les lacunes de la démarche de conception écologique. L'outil TMTA semble, à l'heure actuelle, la solution la plus solide pour remplir cette fonction en permettant de spécifier une tâche aux vues et au regard d'une analyse de domaine de travail. Nous aurons par la suite l'occasion d'approfondir la présentation de cette méthode TMTA.

c. La construction d'un modèle du domaine de travail

Pour modéliser l'espace-problème que constitue le domaine de travail, il existe un outil principal appelé espace d'abstraction/décomposition ou ADS (Naikar et al., 2005). Cet outil s'apparente à une matrice dans laquelle l'analyste entre les contraintes qui émergent du domaine de travail de manière ordonnée. La Figure 10 illustre ce qu'est un ADS. Il s'agit d'un exemple générique, la dimension de décomposition pouvant être plus fine ou plus grossière. ADS s'articule autour d'une matrice à deux dimensions, l'axe horizontal représentant l'espace-problèmes en une dimension de décomposition de l'environnement et l'axe vertical représentant l'espace des problèmes en une dimension d'abstraction. La dimension d'abstraction est souvent appelée dans la littérature comme la hiérarchie d'abstraction ou la dimension moyen-fin ou encore HA alors que la dimension décomposition fait souvent référence à la hiérarchie de décomposition ou partie-tout.

		Décomposition →		
		Système global	Sous-systèmes	Composants
↓ Abstraction	Objectifs fonctionnels			
	Valeurs priorités et mesures			
	Objectifs reliés aux fonctions			
	Objet reliés aux processus			
	Objets physiques			

Figure 10 : Espace de décomposition/abstraction

La dimension d'abstraction se divise généralement en 5 niveaux, du plus abstrait au plus concret.

- Le niveau considéré comme le plus abstrait est le niveau des objectifs fonctionnels. Ce niveau décrit les objectifs fondamentaux qui dirigent le domaine de travail. Ces objectifs sont ceux qui expliquent les raisons fondamentales pour lesquelles un système sociotechnique doit contrôler ce domaine. Il caractérise également les lois de l'environnement qui contraignent le système (par exemple : les lois de la thermodynamique, la gravité...).
- Le second niveau d'abstraction est celui des « fonctions abstraites ». Il représente les lois dirigeant un domaine d'ordre causal ou bien les valeurs et priorités associées à un domaine dit « intentionnel ». « Valeurs priorités et mesures » correspondent aux critères que le système utilise pour mesurer si les objectifs fonctionnels sont réalisés.
- Le troisième niveau est celui des fonctions généralisées ou « processus ». Il décrit les éléments dynamiques du domaine dans lesquels s'articulent les objets du domaine. Le niveau « objectif relié aux fonctions » va réunir toutes les catégories de contraintes renvoyant aux fonctions générales nécessaires pour réaliser les objectifs. Ce niveau comprend une série de verbes d'action comme stocker, générer, produire, perdre, équilibrer, maintenir,...
- Le quatrième niveau est celui des fonctions physiques. Il décrit les objets du domaine comme des fonctions d'utilité. Le niveau « objets reliés aux processus » recouvre tous les objets physiques nécessaires pour réaliser les fonctions généralisées identifiées au niveau précédent. On retrouvera également dans ce niveau les capacités et limites des objets physiques.

Le niveau « objets physiques » recoupe toutes les caractéristiques les plus concrètes des objets à savoir leurs formes, leurs apparences, leurs emplacements ou encore leurs dimensions.

Chaque niveau d'abstraction correspond à une vue sous un angle différent du domaine.

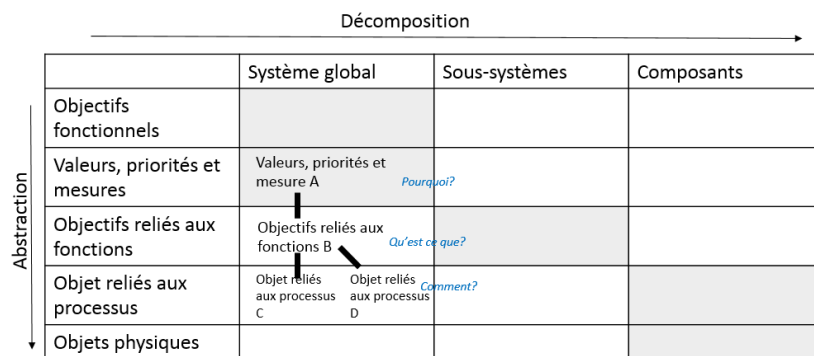
Nous noterons également que dans la littérature l'on retrouve d'autres appellations possibles aux catégories citées préalablement. Mais, les appellations les plus souvent rencontrées sont : objectifs généraux, fonction abstraite, processus, fonctions physiques, formes physiques (Li et al, 2014), (Jamieson & Vicente, 2001), (Miller, 2004). Ces appellations sont particulièrement adaptées pour les systèmes causaux. Dal Vernon, (2000) explique que la nomenclature proposée par Rasmussen permet d'être plus clair pour distinguer le contenu de chaque niveau d'abstraction et les relations entre les niveaux. Naikar et al., (2005) soulignent néanmoins l'importance d'adapter au contexte du domaine étudié les nomenclatures utilisées pour caractériser les différents niveaux d'abstractions.

Tableau 3: Comparaison nomenclature des fonctions abstraites

Nomenclature 1 (Rasmussen, 1994)	Nomenclature 2 (Rasmussen, 1998)
Objectifs fonctionnels	Objectifs fonctionnels
Fonctions abstraites	Valeurs, priorités et mesures
Processus	Objectifs reliés aux fonctions
Fonctions physiques	Objet reliés aux processus
Formes physiques	Objets physiques

Les relations qui unissent chaque niveau d'abstraction sont de type moyens-fins. Ces relations peuvent être caractérisées par la suite de questions « Comment ? Qu'est-ce que ? Pourquoi ? »

L'analyste doit être amené à se poser la question de savoir qu'est-ce qui doit être fait pour que le système fonctionne. Le niveau inférieur lui permet de répondre à comment cela fonctionne, tandis que le niveau supérieur répondra à la question pourquoi cela devrait être fait comme ceci. La Figure 11 illustre de manière générale la relation moyen-fin qui peut unir trois niveaux d'abstraction.

**Figure 11 : Relations moyens-fins (traduit de l'anglais Naikar et al., 2005)**

La dimension « décomposition » est le second axe qui constitue l'ADS. Dans la Figure 10, on observe une décomposition en trois niveaux du système vu de manière globale, comme un ensemble de sous-systèmes est décomposé en un agglomérat de composants individuels. On observe donc une représentation du système de manière très globale, jusqu'à atteindre au niveau composant, une vision beaucoup plus fine du système, comme si l'on zoomait au fur et à mesure sur le système.

Naikar et al., (2005) propose un guide de questions pour aider à définir cette décomposition (Tableau 4).

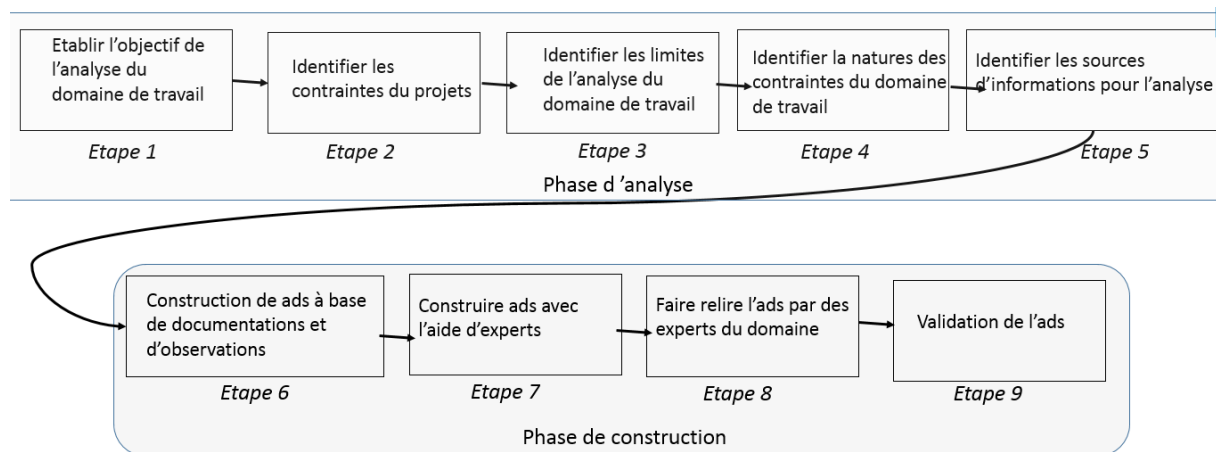
Tableau 4 : Guidelines pour compléter la hiérarchie de décomposition (traduit de l'anglais Naikar et al., 2005)

Questions	Mots clés
<p>Niveau de décomposition :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quel vue peut représenter l'ensemble du système? • Quel est le niveau le plus grossier par lequel l'opérateur voit le système de travail? • Qu'est ce que l'opérateur voit comme une partie du système de travail? • Quels sont les différents niveaux de détail par lequel le travailleur voit le système de travail? <p>Relation partie-tout :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Est-ce que les entités de plus haut niveau sont composés des entités de plus bas niveaux? • est ce que les entités de bas niveaux composent l'entité de plus haut niveau? 	<p>Nom d'ensemble ou de parties : Organisations, espaces physiques, structures conceptuels, groupes, équipe, systèmes, sous-systèmes, unité, pièces, branches, secteurs...</p>

Il est supposé que mentalement, l'opérateur se déplace globalement selon la diagonale (cases grisées de la Figure 10) qui part des hauts niveaux d'abstraction et du point de vue le plus général, jusqu'au niveau les plus concrets et les plus fins du domaine de travail (Vicente et al., 1995).

d. Approche méthodologie pour la construction d'un ADS

La conception d'une ADS est un processus assez long qui se décompose en 9 étapes (Naikar et al., 2005) (Figure 12).

**Figure 12 : Étape dans la conception d'une ADS**

- **Étape 1 : Établir les objectifs de l'analyse.** Lors de cette étape, l'analyste doit définir qu'elles sont les problèmes auxquels il veut répondre à travers une analyse du domaine de travail. L'analyste définit également à ce niveau comment il utilisera l'analyse du domaine de travail pour répondre à ces problèmes. Rasmussen et al. (1994) recommandent l'étude de livres, de rapports d'activités portant sur le domaine de travail afin d'appréhender dans une première phase ce qu'est le domaine de travail et ce qui le définit.

- Étape 2 : Identifier les contraintes du projet. Un projet d'analyse de domaine de travail est soumis à des contraintes parfois temporelles, parfois financières qui vont diriger l'ampleur de l'analyse. Plus l'analyste dispose de temps, plus le budget est important, et plus l'analyse pourra être poussée dans les détails. De même, l'analyste pour des raisons temporelles et/ou budgétaires peut être amené à ne mener que le premier cycle itératif (étape 6) de l'analyse du domaine de travail et s'arrêter à cette étape. Il est donc important de prendre en considération très tôt l'ampleur du type d'analyse que l'on souhaite mener.
- Étape 3 : Déterminer les limites de la WDA. Délimiter les frontières de l'analyse est un choix artificiel et arbitraire. Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise limite. Néanmoins l'analyste doit prendre en considération deux points importants : l'objectif de l'analyse du domaine de travail et les contraintes du projet.
- Étape 4 : Identifier la nature des contraintes. Il va s'agir de définir si le système est plutôt de type causal ou de type intentionnel.
- Étape 5 : Identifier les potentielles sources d'information. Le Tableau 5 illustre les types de sources d'informations pouvant être pertinents en fonction des différents niveaux de la hiérarchie d'abstraction. La première et principale porte d'entrée est la documentation écrite sur le système de travail (manuels techniques et d'ingénierie, rapports industriels, livres, brochure commerciale, procédures opérationnelles, manuel d'entraînement, rapport d'incidents, plans, dessin industriels...).

Tableau 5 : Sources d'information par niveau de HA (traduit de l'anglais Naikar et al., 2005)

	Documents	Experts du domaine
Objectifs fonctionnels	Stratégique, planning, rapports et documents opérationnel (doctrine, budget...)	Direction, manager (chef, décideurs, commandement...)
Valeurs, priorités et mesures		
Objectifs-reliés aux fonctions	Documents opérationnels et d'entraînements (manuel tactique, procédures d'opérations standard)	Chef d'équipe, opérateurs, chef de département (pilotes, opérateur en supervision)
Objets reliés au processus	Document d'ingénierie et manuel techniques	Opérateurs, technicien de maintenance, ingénieurs
Objets physiques		

Une seconde source d'information est l'observation du travail. L'observation permet à l'analyste de voir quels outils l'opérateur utilise et de comprendre le fonctionnement en condition réelle de l'opérateur.

La troisième source d'information est celle provenant d'entretiens avec les opérateurs. Ces entretiens peuvent prendre plusieurs formes. Rasmussen et al., (1994) conseillent tout particulièrement l'utilisation d'entretiens semi-directifs. L'entretien semi-

directif est une technique d'entretien qui consiste à orienter en partie le discours de la personne interrogée autour de certains thèmes définis préalablement par l'interviewer dans un guide d'entretien. Lors de ces entretiens, l'analyste cherchera à identifier les situations typiques et les tâches de l'opérateur. Des questions devront porter sur des tâches spécifiques et l'analyste cherchera à faire ressortir les buts et les intentions. Les questions pourront s'articuler autour de l'explication des cheminements au sein de la structure du domaine de travail. On pourra demander à un opérateur de nommer toutes les fonctions importantes avec lesquelles il interagit et ensuite les relations moyens-fins pourront être explorées à l'aide de questions sur les objectifs des opérateurs, puis sur comment cela est réalisé. On pourra également demander à l'opérateur de décrire l'ensemble des fonctions qu'il accomplit au cours d'une journée entière.

Tableau 6 : Guidelines pour identifier les données composant une HA (traduit de l'anglais Naikar et al., 2005)

	Questions	Mots clés
Objectifs fonctionnels	<p>Objectifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> Pour quel raison le système de travail a-t-il été conçu? Quels sont les objectifs les plus élevés du système de travail Qu'est ce qui est nécessaire pour garder le système en sécurité? <p>Contraintes externes :</p> <ul style="list-style-type: none"> Quelles sortes de contraintes l'environnement impose au système de travail? Quelles lois et régulations, l'environnement impose au système? 	<p>Objectifs : raisons, buts, intentions, ambitions, cible, philosophie, principes,</p> <p>Contraintes extérieurs : lois, régulations standards, règles, limites, principes, conventions,...</p>
Valeurs, priorités et mesures	<ul style="list-style-type: none"> Quels critères peuvent être utilisés pour juger si le systèmes à atteints ses objectifs? Quels critères peuvent être utilisés pour juger si le système de travail à satisfait aux contraintes extérieurs? Comment est ce que les performances des différentes fonctions du système de travail sont mesurées? 	<p>Critères, mesures, tests, évaluation, estimations, résultats</p> <p>Mesures de : efficacité, temps fréquence, quantité,...</p> <p>Valeurs : lois, standards, règles,...</p>
Objectifs reliés aux fonctions	<ul style="list-style-type: none"> Quelles fonctions sont nécessaires pour atteindre les objectifs du système de travail? Quelles fonctions sont nécessaires pour satisfaire les contraintes externes du système de travail? Quelles fonctions sont réalisés avec les ressources physiques du système de travail? 	<p>Fonctions, rôles, processus, activités, opérations...</p>
Objets reliés aux processus	<ul style="list-style-type: none"> Que font les objets physiques dans le système de travail? Quelles sont les fonctions, capacités et limites des objets physiques dans le système de travail? Quelles fonctionnalités sont nécessaires pour assurer les objectifs reliés aux fonctions? 	<p>Processus chimique, électriques, limites, capacités, objets...</p>
Objets physiques	<ul style="list-style-type: none"> Quel est la topographie ou l'organisation des objets physiques du système? Quel est l'apparence des objets physiques? 	<p>Forme, localisation</p>

Quand cela est possible, il est préférable de confronter l'avis de plusieurs experts du domaine pour obtenir des points de vue plus riches sur le domaine de travail (Flach et al., 1998).

Naikar et al., (2005) proposent une série de questions permettant d'identifier les besoins pour chaque niveau de la hiérarchie d'abstraction Tableau 6. Ces questions peuvent servir à faire ressortir les informations pertinentes.

- Étape 6 : la construction de l'ADS. La première itération va s'articuler autour de l'analyse des documents et les observations du travail. La construction de l'ADS conduit à identifier les propriétés du domaine de travail, à définir les niveaux d'abstractions et de décomposition, à développer une première maquette de l'ADS, puis à évaluer qu'elles sont les cellules de l'ADS les plus pertinentes.
- Étape 7 : la construction d'une ADS lors d'une seconde itération. La seconde itération va compléter l'ADS par des informations collectées auprès d'experts à travers des entretiens
- Étape 8 : la relecture par des experts. Cette étape de l'analyse va permettre de vérifier dans un premier temps si les différents éléments de l'analyse du domaine de travail sont corrects et deuxièmement de vérifier si d'autres aspects de l'analyse du domaine de travail ne sont pas manquants. Idéalement plusieurs experts du domaine sont nécessaires. Ces experts sont de différents niveaux de responsabilité (ingénieurs, opérateurs, décideurs) afin de couvrir l'ensemble des niveaux de la hiérarchie d'abstraction. Cette étape est relativement coûteuse en temps et en effort, car elle fait intervenir de nombreux acteurs.
- Étape 9 : Validation de l'ADS. Puisqu'un modèle de domaine de travail décrit une partie de la réalité, il peut, comme tout modèle, être potentiellement vérifié et validé. Appliqué à la WDA, le processus de vérification s'attache à révéler si les différentes propriétés du domaine de travail sont présentes puis à valider si elles ont été correctement placées dans les bonnes cellules de la matrice de domaine de travail, en fonction de leurs niveaux d'agrégation et d'abstraction. Il abordera également la validation du bon fonctionnement des relations « moyen/fins » entre ces propriétés. Un principe important à suivre pendant la WDA est que chaque objet dans le domaine doit être représenté par des affordances qui sont présentes à chaque niveau d'abstraction (Burns et Hadjukiewicz, 2013). Aujourd'hui, malgré l'importance de cette étape, peu de travaux existent sur la validation de modèles issus d'une WDA.

e. Un processus d'analyse encore coûteux en temps et en effort

Le processus d'analyse est coûteux en temps en effort. Cela peut rallonger significativement le processus de conception industrielle. (Vicente, 2002).

Skilton, Cameron, & Sanderson, (1998) ont proposé un outil informatisé pour faire face à ce problème. Cet outil logiciel appelé « work domain analysis workbench ou WDAW » doit permettre à l'analyste de concevoir une ADS de manière plus rapide, tout en ne lui imposant pas de structure préétablie dans sa manière de concevoir une analyse du domaine

de travail. WDAW permet à l'analyste d'éditer, de visualiser, de manipuler les informations ou contraintes d'un domaine de travail. La force de ce logiciel est de permettre au concepteur de se concentrer sur la construction de la structure fonctionnelle de l'analyse du domaine de travail plutôt que les moyens techniques de représenter le domaine de travail. Ainsi toute une gamme d'outils est offerte aux concepteurs pour construire graphiquement un domaine de travail en mettant l'accent sur une palette d'outils permettant de représenter les différents types de liens fonctionnels entre les informations contenues aux différents niveaux d'abstractions. De plus, WDAW permet de gérer les documents et les enregistrements vidéo ayant servis à la construction et la constitution de la matrice de domaine de travail, il est possible de créer des liens hypertextes vers les documents afférents à la construction de la matrice. Cet outil se révèle donc être un véritable catalyseur et environnement logiciel pour soutenir de nombreuses facettes de la conception d'une matrice de domaine de travail. Néanmoins il ne permet pas le passage, par la suite, à l'écran des informations dégagées par l'analyse de travail. Cet outil constitue donc une première base intéressante, mais insuffisante pour aboutir à une interface écologique. De plus, WDAW ne propose pas de méthode ou d'outil pour la validation du domaine constitué, cette phase de vérification et validation reste encore à la charge d'analyste et est effectué le plus souvent de manière manuelle sur la base d'entretiens avec des opérateurs experts, ce qui reste une démarche lourde et coûteuse en temps et en effort.

2.1.4. Une WDA articulée au modèle SRK

La deuxième composante importante de cette triade est l'humain ou la machine qui agit sur le système. L'humain est considéré comme un être orienté vers des buts à atteindre (Vicente & Rasmussen, 1990). Il va sélectionner les buts à atteindre et rechercher les informations pertinentes pour réaliser ces objectifs. Quand l'humain fait face à une activité qui lui est familière, il sera dirigé vers un but et contrôlé par des procédures et/ou des règles. À l'inverse quand l'activité de l'humain se déroule dans un contexte inhabituel où les règles ou procédures fournies ne sont pas suffisantes pour résoudre l'activité, les comportements sont contrôlés par les objectifs à remplir par l'agent et ce dernier va chercher la séquence la plus pertinente pour répondre au problème sur la base de ses connaissances.

L'efficacité de l'humain à faire face à des tâches complexes est en grande partie due à la présence d'un large répertoire de différentes représentations mentales.

Rasmussen et Vicente proposent de prendre en considération l'humain en se basant sur un modèle de traitement de l'information appelé SRK. Ce modèle va servir de base pour la conception d'une interface écologique et de fondement pour traduire les informations collectées dans la WDA en informations perceptivement efficace pour aider l'opérateur. Le domaine de travail reflètera les différents principes invoqués ici. Une interface écologique devra soutenir les trois niveaux habiletés, règles, connaissances. Elle devra permettre une

représentation exhaustive du domaine pour soutenir un contrôle basé sur des connaissances, assurer la bonne perception de cette représentation et une manipulation directe, afin de soutenir la mise en œuvre des contrôles cognitifs basés sur les règles et les habiletés. Ce modèle SRK au même titre que l'analyse du domaine de travail est un des principes fondateurs, que se doit de respecter un concepteur d'interfaces écologiques (McIlroy & Stanton, 2015).

a. Le modèle Skills, Rules, Knowledge ou SRK

Le modèle SRK ou en français habiletés, Règles, Connaissance, renvoi à trois types de comportement ou de processus psychologiques présents dans le traitement de l'information de l'opérateur (Rasmussen, 1986). La Figure 13 illustre le principe SRK. Selon le principe SRK l'information peut être interprétée de 3 façons différentes : signaux, signes, ou symboles. La façon dont elle est interprétée déterminera quel niveau cognitif sera activé. En facilitant les comportements basés sur les habiletés et sur les règles dans les tâches familières, des ressources cognitives supplémentaires peuvent être consacrées aux comportements basés sur les connaissances, qui sont importants pour gérer les événements non anticipés (Wickens & Hollands, 2000). Ainsi l'objectif sera de favoriser l'interprétation de l'information comme des signaux et des signes plutôt que comme des symboles.

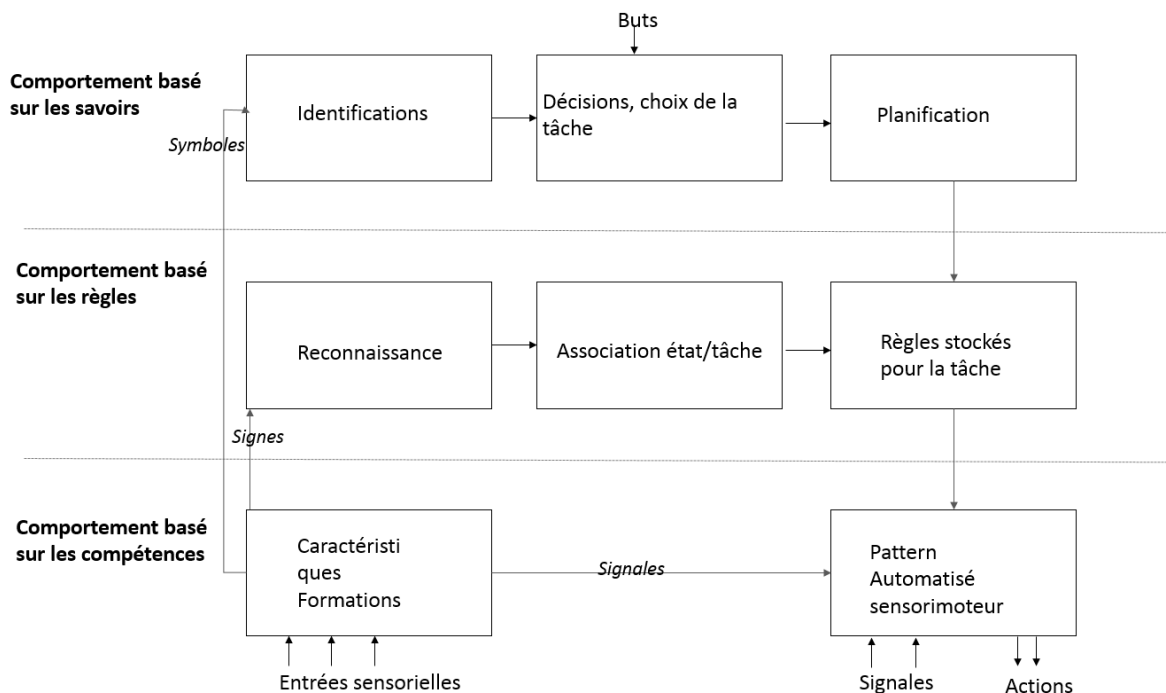


Figure 13 : Le modèle SRK (Rasmussen, 1986)

- Le comportement basé sur les habiletés. Ce premier comportement est basé sur les comportements sensori-moteurs de l'humain. Ces comportements sont contrôlés d'un point de vue cognitif sans l'appel à un effort attentionnel. L'exemple le plus couramment cité est celui de l'action de faire du vélo qui chez la plupart des gens est devenu un acte automatisé avec donc un comportement basé sur les habiletés et pour lequel peu

d'attention est nécessaire une fois que la personne a appris à faire du vélo. Ce niveau de comportement traite les informations provenant d'une interface homme-machine comme des signes. L'opérateur doit être capable d'agir directement sur l'interface. (McIlroy & Stanton, 2015).

- Le comportement basé sur les règles. Le second des comportements se caractérise par l'usage de règles et de procédures pour sélectionner une séquence d'actions dans une situation qui est familière à l'humain. Les règles peuvent être un ensemble d'instructions acquises par un opérateur par expériences ou données par des superviseurs ou formateurs. Les opérateurs ne sont pas obligés de connaître les principes sous-tendant ces règles pour réaliser leur comportement. Quand quelqu'un fait une recette, il n'est pas obligé de connaître les principes expliquant la démarche, mais doit juste se contenter de suivre la procédure pour arriver à obtenir le plat souhaité. À ce niveau de comportement, l'on attend que les indices ou signaux fournis par l'interface soit consistants avec les contraintes ressorties de l'analyse du travail.
- Comportement basé sur les connaissances. Le troisième et dernier des comportements porte sur le savoir de l'opérateur. Ce genre de comportement doit être employé face à des situations nouvelles ou non anticipées. Les opérateurs doivent savoir les principes fondamentaux, les théories et les lois qui gouvernent le système. Puisque les opérateurs ont besoin d'établir des objectifs explicites (décisions) à partir du système, la charge mentale est typiquement plus élevée que face à des comportements se basant sur les habiletés et les règles. Pour favoriser, les raisonnements basés sur les connaissances, l'interface devra supporter l'opérateur en affichant la structure de décomposition hiérarchique de manière évidente à l'utilisateur.

b. Signes, signal, symboles

L'information perçue en fonction d'un mode de contrôle cognitif particulier (S, R ou K) prend une signification variable pour l'opérateur. Les performances au niveau des habiletés sont guidées par des valeurs caractéristiques issues d'expériences précédentes ne prenant pas part directement à un contrôle de l'espace-temps, mais agissant comme des indices ou des signaux activateurs de comportements de routines. Au niveau des règles, l'information sera perçue comme des signes. Elle est perçue ainsi quand cela sert à activer ou modifier des actions ou manipulations prédéfinies. Les signes renvoient à des situations ou à des comportements particuliers par convention ou via des expériences passées. Ils ne font pas référence à des concepts ou des propriétés fonctionnelles de l'environnement. Les signes possèdent généralement des entités qui renvoient à des états ou des situations dans l'environnement ou directement à des buts et des tâches d'une personne (exemple : vanne ouverte ou vanne fermée). Ils ne peuvent pas être utilisés pour mener des raisonnements

fonctionnels, ou générer de nouvelles règles, ou prédire la réponse à une perturbation non familière de l'environnement.

Pour tout ce qui concerne les raisonnements causaux fonctionnels dans le but d'expliquer ou de prédire les comportements non familiers de l'environnement, les informations doivent être perçues comme des symboles. Là où les signes font référence aux règles pour l'action, les symboles renvoient aux concepts s'attachant aux propriétés fonctionnelles et peuvent être employés pour raisonner et calculer à partir des significations.

La distinction entre signes, signaux, symboles dépend du contexte dans lequel ces informations sont présentées et non selon la forme.

2.1.5. L'interface : un support intuitif et efficace

Les concepteurs envoient un message aux utilisateurs par la conception d'un système interactif. Par le passé ce message était souvent fruste, sans effort ergonomique sur les modalités de sa présentation (Shneiderman, 1992). De nos jours, les interfaces sont puissantes et offrent un très bon potentiel pour fournir un support à la prise de décision et à la résolution de problème. Cependant, nombre d'interfaces échouent encore à constituer une véritable aide.

Le but d'une interface écologique est de fournir de manière optimale un support à la prise de décision et à la résolution de problème. Le point fondamental est que la conception de l'interface doit être faite au regard du contexte imposé par les deux autres composantes de la triade (le domaine et l'agent).

La métaphore de la pièce manquante du puzzle (Bennett & Flach, 2011) illustre très bien le rôle que doit jouer l'interface (Figure 14). L'interface est vue comme une pièce de puzzle manquante que le concepteur doit façonner le mieux possible pour qu'elle s'accorde le mieux avec les autres constituants du puzzle.

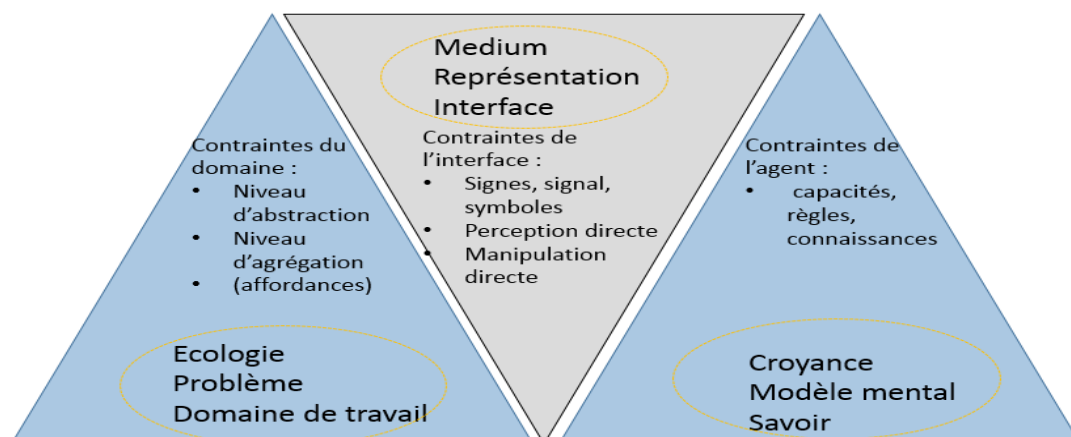


Figure 14 : Place de l'interface dans le modèle triadique (Traduit de l'anglais Bennett & Flach, 2011)

Plusieurs contraintes ou grands principes de conception comme les principes de manipulation directe, de perception directe, et du « visual momentum », vont aider le concepteur à façonner cette pièce du puzzle de manière correcte.

a. Manipulation directe

Le premier grand concept est celui de la manipulation directe. Shneiderman, (1982) a défini la manipulation directe à travers les propriétés ou caractéristiques suivantes:

- Une représentation permanente et continue des objets et des actions possibles
- Le remplacement d'une syntaxe complexe par des actions physiques et la sélection de boutons
- Les opérations sont rapides, réversibles, leur effet sur l'objet est immédiatement visible.

Concrètement une interface s'appuyant sur la manipulation directe va ne nécessiter qu'un savoir minimum sur l'ordinateur ou sur les calculs.

La notion de manipulation directe est une notion qualitative. La qualité de direct renvoie à l'idée que peu de ressources cognitives sont nécessaires pour utiliser une interface. À l'inverse quand beaucoup de ressources cognitives sont employées pour utiliser une interface, le sentiment est à la manipulation indirecte.

Qualitativement, la manipulation directe se caractérise selon deux critères. Le premier critère est appelé distance. La notion de distance correspond à l'écart entre les buts de l'utilisateur et la manière de spécifier ces buts physiquement sur le système. La seconde notion est nommée l'engagement, elle correspond au sentiment pour l'utilisateur d'être directement en train de manipuler les objets visés. Shneiderman, (1992) utilise la métaphore du monde réel pour représenter ce qu'il appelle l'engagement direct. Dans la métaphore du monde, l'interface est elle-même un monde où l'utilisateur peut agir où il y aura des changements d'états en réponse aux actions de l'utilisateur. Il n'y a, ici, pas d'intermédiaire entre l'utilisateur et le monde.

Pour résumer, une bonne interface du point de vue de la manipulation directe doit permettre un lien sensori-moteur étroit entre l'objet manipulé et le but de cette manipulation, tandis que l'opérateur considère cet objet comme un élément composant l'environnement de synthèse dans lequel il navigue. Ainsi la manipulation directe renvoie aux objets de l'interface sur lequel un agent peut agir pour contrôler les données entrantes du domaine de travail.

La principale limite de la manipulation directe est le manque d'abstraction (Hutchins, Hollan, & Norman, 1985), c'est-à-dire la difficulté de représenter des opérations abstraites, telles que des répétitions. Pour répéter 20 fois une même opération, le sujet doit recommencer vingt fois un même mouvement. De même, le choix d'une métaphore concrète restreint l'utilisateur à une approche particulière du problème. Une métaphore peut s'avérer limitée pour certains nouveaux problèmes, peut ne pas être celle qu'il aurait choisie, et enfin, peut ne pas être celle que l'auteur a conçue (si l'utilisateur interprète les représentations de manière personnelle) (Benbasat & Todd, 1993).

Selon une étude de Gillian et al. (1990), le temps nécessaire aux actions motrices est inférieur dans un système de menus (dérouler et cliquer) par rapport à un système de

manipulation directe (cliquer et déplacer). Or, Benbasat et Todd (1993) observent que les sujets réalisent plus rapidement leur tâche au moyen d'une interface reposant sur la manipulation directe qu'au moyen d'un système de menus. Si, malgré une perte de temps au niveau strictement moteur, l'utilisateur gagne du temps dans la réalisation de la tâche, c'est, selon ces auteurs, grâce à un fort gain de temps au cours de la phase de compréhension des réponses du système et de planification de l'action. Ces différences semblent disparaître cependant dès que l'utilisateur devient familier avec le système.

Une interface écologique est une extension naturelle du principe développé par Shneiderman et Hutchins (Bennett & Flach, 2011) en ce sens où les deux approches ont le même but, c'est-à-dire réduire la charge cognitive du travail et enrichir le couple perception-action. Mais, Schneiderman propose que l'on doive d'abord spécifier les exigences de la tâche et étudier les capacités et limites cognitives avant d'espérer pouvoir réduire l'écart entre les deux, alors que l'approche écologique interroge d'abord la structure de l'environnement.

b. Le visual momentum

Le contrôle de nombreuses informations (parfois des milliers de variables) rend les systèmes particulièrement difficiles à superviser. Le seul moyen d'avoir accès à ce domaine de travail pour l'opérateur est à l'heure actuelle la fenêtre de l'écran d'ordinateur, celle d'un smartphone ou d'une tablette. Cet espace est alors restreint et la combinaison de la complexité du système avec le caractère restreint de l'espace de visualisation peut affecter l'efficacité du travail. Toutes les informations nécessaires pour un contrôle efficace ne peuvent être affichées en même temps. L'opérateur doit donc intégrer les informations écran par écran pour se constituer une représentation correcte du domaine de travail, et retrouver à travers cette succession d'écrans les informations pertinentes par rapport à sa tâche.

Pour répondre à cette problématique, Woods, (1984) va définir le concept de « visual momentum » comme une mesure de la capacité de l'utilisateur à extraire et à intégrer l'information à travers plusieurs écrans ou dit autrement une sorte de mesure de la distribution de l'attention. Quand un opérateur arrive sur un nouvel écran, il se passe alors une remise à zéro du « visual momentum ». Le « visual momentum » correspond au temps pris par l'opérateur pour établir le contexte du nouvel écran auquel il est confronté. Plus l'effort mental de l'opérateur est important pour replacer dans son contexte le nouvel écran moins le « visual momentum » sera élevé, à l'inverse moins l'effort mental de l'opérateur est élevé plus le « visual momentum » sera important.

Le concepteur devrait donc essayer de faciliter cette transition d'écran à écran. Le concepteur doit savoir si l'opérateur sait où il se situe, où il était et vers où il va. La question clé est de savoir si l'interface prépare l'opérateur à sa nouvelle destination à travers des transitions qui l'aident cognitivement.

Le visual momentum doit être soutenu au niveau les plus hauts de la structure de l'interface (interface avec de multiples écrans), mais également au niveau les plus bas de la structure de l'interface (transition à l'intérieur d'une page ou d'un écran) (Bennett & Flach, 2011). La Figure 15 regroupe un ensemble de méthodes de la moins efficace à la plus efficace pour augmenter le visual momentum (Woods, 1984).

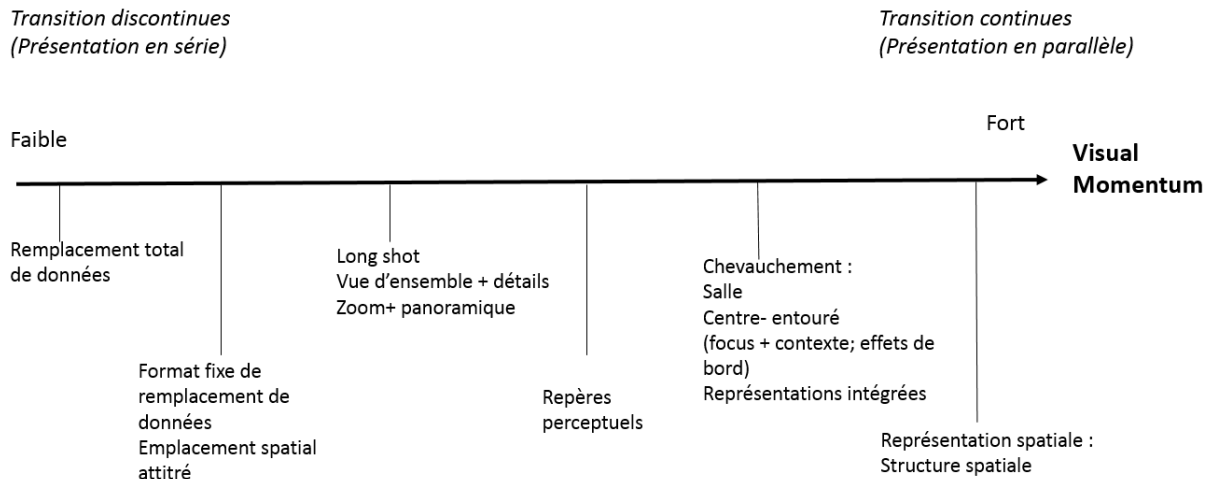


Figure 15 : Visual momentum (traduit de l'anglais Woods, 1984)

- Le remplacement total de données. C'est à proprement parler la méthode la moins efficace pour avoir un moment visuel fort. En effet toutes les informations à l'écran sont remplacées, il n'y a pas non plus de repères spatiaux comme dans la technique suivante. Chaque écran semble nouveau à l'opérateur.
- Le format fixe de remplacement de données. Cette méthode va permettre d'augmenter le visual momentum grâce à une sorte d'orientation cognitive de l'opérateur. L'opérateur va apprendre où se situent des objets spécifiques (menu, fonctionnalité, etc.) et des informations à travers les écrans successives. L'opérateur se constitue une sorte de cartographie fonctionnelle à travers les vues. Cela contribue au développement de processus automatiques qui peuvent améliorer l'efficacité des performances humaines. (Schneider & Shiffrin, 1977). L'interface écologique RAPTOR utilise cette technique, elle permet d'améliorer le moment visuel sur 3 aspects. Elle permet à la fois de limiter l'effort cognitif nécessaire à la recherche d'information, de rendre les nouvelles informations disponibles dans le contexte de la vue originel, et enfin de faciliter la transition entre les nouvelles et anciennes informations grâce à un contexte visuel en commun. (Bennett, Posey, & Shattuck, 2008).
- Le « long shot ». Cette méthode se décompose en deux techniques. La première technique est celle consistant à utiliser une vue d'ensemble + les détails. Cette technique fournit une vision globale de la situation. Le détail donne une vision plus détaillée d'un aspect précis de la situation globale. La seconde technique complémentaire à la première est la technique de la vue zoom + panoramique. La vue zoom permet de changer la

résolution portée à l'information regardée et la vue panoramique autorise l'opérateur à changer le focus de ce qu'il est en train d'observer. Adobe Photoshop est un excellent exemple d'application de ces principes (Bennett & Flach, 2012). Ces techniques favorisent le visual momentum en aidant la transition entre les différentes vues dans l'ensemble de l'espace de travail. L'opérateur sait où il est actuellement, où il peut se déplacer dans le futur et comment les mécanismes de contrôle peuvent être utilisés pour faciliter cela.

- La technique des repères perceptifs. Cette technique utilise des repères qui sont des représentations occupant un espace dédié et fournissant des indices aux regards d'aspects significatifs du domaine de travail dans lequel on peut naviguer. Le meilleur exemple pour caractériser cette technique est celui de la librairie virtuelle (Pejtersen, 1992). Le système interactif qu'est la librairie virtuelle de Pejtersen, reproduit le processus de recherche de livre comme dans une vraie librairie. Les repères visuels dans le domaine de travail augmentent le visual momentum en facilitant la navigation entre les vues. Ces repères sont spatialement alloués, permettant la consistance et le traitement automatique et facilitant par conséquent la localisation des informations de navigations reliées. Ces repères fournissent une vue anticipée de la future destination de l'opérateur (à la fois des nouvelles destinations ou des destinations précédemment visitées). Cette prévisualisation oriente l'opérateur à la fois visuellement et cognitivement, et permet de faciliter la transition entre les vues.
- La technique du chevauchement. Elle est décrite comme une stratégie générale pour augmenter le visual momentum en fournissant une vue supplémentaire du contexte pour encadrer la présentation de l'information. Plusieurs variantes à la technique du chevauchement permettent d'aboutir à un effet similaire. La technique de la salle consiste à augmenter le visual momentum en donnant accès à un ensemble d'informations ou autres ressources qui sont nécessaires pour la réalisation d'activités multiples et asynchrones. Les objectifs de cette variante sont multiples. Le premier est de fournir à l'opérateur le potentiel pour définir des contextes de travail alternatifs qui peuvent être intégrés pour répondre au besoin spécifique d'une tâche. Le second est de fournir un espace de travail coordonné. Le troisième est de permettre à l'opérateur de composer, sauvegarder et manipuler des ensembles de contexte de travail comme une seule unité cohérente. La variante basée sur la technique des vues centrer/entourer augmente le moment visuel à travers une présentation des informations en parallèle. L'information que l'opérateur utilise actuellement est présentée en haute résolution au centre de l'écran et les informations annexes que l'opérateur n'utilise pas présentement, sont présentées sur les côtés, avec une plus faible résolution. Les informations mises en haute résolution et en basse résolution sont sur un même écran. Cela distingue cette technique de la technique vue précédemment du long shot qui représente les informations sur des affichages séparées. La méthode centrée/entourée a également

une variante qui consiste en l'effet latéral de visualisation. Cette variante aide à afficher les relations fonctionnelles. L'idée est d'assurer une forte dynamique visuelle à l'opérateur en s'assurant qu'il ait la conscience des effets latéraux causés par un autre évènement. Ainsi quand quelque chose se produit sur le centre de l'écran et à des conséquences sur d'autres données, l'opérateur pourra s'apercevoir qu'il y a un lien d'effets et de conséquences. La technique des représentations intégrées augmente le visual momentum en identifiant les relations fonctionnelles entre les données et les tâches utilisateurs et en transposant ces relations dans la structure du système d'affichage. Bennett & Flach, (2012) mettent en avant que la logique des interfaces écologiques ou de l'approche par configuration (Bennett & Flach, 2011) vise justement à utiliser cette technique en identifiant les structures et les données du domaine de travail et en essayant d'intégrer toutes ces données sur un seul écran ou tout du moins sur un minimum d'écrans possibles. L'intégration visuelle de l'information à travers les différents niveaux d'abstraction augmente le visual momentum parce que cela fournit une explication graphique continue des évènements sur le domaine.

- La représentation spatiale. La dernière des techniques est celle qui a le meilleur potentiel pour augmenter le visual momentum. Cette technique est utilisée pour incorporer une structure spatiale et une organisation dans le contrôle et l'affichage de l'interface. Il va s'agir de traduire les données en un espace où l'opérateur se déplacerait. L'utilisateur retiendrait alors des chemins. L'utilisation d'environnement virtuel est un très bon exemple d'application de cette technique.

c. Perception directe

La perception directe, concept proposé par Gibson (1979) est un concept qui a également été appliqué au contexte des interfaces par Flach & Vicente, (1989). La perception directe relève de la capacité à percevoir directement la signification des objets présents dans l'environnement ambiant. Cette perception directe peut faire l'objet d'un apprentissage (« Perceptual Learning »). Dans le contexte des IHM, elle va pouvoir se produire quand l'interface fournit des représentations qui reflètent significativement pour l'opérateur les contraintes du domaine de travail : les possibilités pour l'action et les limitations sur l'action (affordances). Les concepts de perception et de manipulations directes renvoient à la même notion théorique que celle de réduire la distance psychologique entre l'humain et le problème. Pour aider à la perception directe, il s'agira de construire une représentation qui reflète la structure du domaine, à travers les différents niveaux d'abstraction et d'agrégation qui caractérisent l'environnement de travail du point de vue des opérateurs visés.

2.2. *De la théorie aux choix techniques de conception*

Le processus de conception d'interfaces homme-machine implique principalement la représentation d'informations sous un format visuel. Nous ferons un tour d'horizon des pratiques conceptuelles existant pour représenter de l'information, puis nous nous concentrerons sur la description des représentations concrètes qui caractérisent aujourd'hui une conception écologique d'interface.

2.2.1. Un tour d'horizon des concepts de représentations graphiques de l'information

a. Théorie de la charge cognitive

Ces dernières années de nombreux travaux se sont intéressés à comment représenter l'information de la meilleure manière qu'il soit. L'interaction entre les formats de présentation et la qualité de l'apprentissage est au cœur de la recherche sur le sujet. Chaque information est traitée au niveau de deux types de mémoires : la mémoire de travail (MDT), caractérisée par une capacité limitée en terme de traitement et la mémoire à long terme d'une capacité quasi illimitée et beaucoup plus durable (Jamet, Le Bohec, & Hidrio, 2003). Les connaissances à long termes sont organisées sous forme de schémas c'est-à-dire dans un format correspondant à la manière dans laquelle elles seront utilisées ensuite (Chi, Glaser, & Rees, 1981). Cette théorie des schémas est primordiale, car elle est la base de l'expertise selon Sweller, (2002) et de la théorie de la charge cognitive. En effet les schémas, donnent du sens à tous les informations contenus en mémoire à long termes en catégorisant de multiples stimuli sous forme d'un élément catégorisé à traiter. Les limites de la mémoire de travail peuvent donc perturber la construction, la mise à jour, l'automatisation et le stockage des schémas de la mémoire à long terme. Sweller propose trois types de charges cognitives (la charge cognitive intrinsèque, la charge cognitive extrinsèque comprenant la charge cognitive inutile et la charge cognitive pertinente). Sweller dégage de l'étude de ces différents types de charges à travers plusieurs expérimentations, plusieurs recommandations sur la présentation de l'information, parmi lesquels le besoin d'intégrer les informations pour éliminer l'effet de dissociation de l'attention, utilisé deux modalités sensoriels plutôt qu'une ou bien encore ne pas présenter d'informations redondantes (Chanquoy, Tricot, & Sweller, 2007).

b. Métaphore

La métaphore est un outil conceptuel de base de nos jours dans la conception d'interfaces graphiques. Il s'agit d'utiliser des images graphiques pour représenter des objets ou des actions d'un domaine. Quand les images sont petites et que l'on peut agir dessus on appelle cela des icônes. Les métaphores sont utilisées pour lier entre eux des nouveaux et des domaines d'application inconnus à de plus familiers. Les métaphores sont les concepts

fondamentaux, les termes et les images par lesquelles les informations vont être facilement reconnues, comprises et rappelées (Marcus, 1998). Elles vont faciliter la réutilisation des connaissances. Un exemple typique de contexte métaphorique associé à des objets physiques familiers sont ceux associant les éléments du bureau avec des objets comme le tiroir, les fichiers, les papiers, la corbeille. Marcus (1998) propose une synthèse des métaphores que l'on retrouve au sein des IHMs. Une des catégories de métaphore les plus utilisées est la catégorie des métaphores de type pragmatique qui permet à l'utilisateur de comprendre et d'intégrer le fonctionnement du système en des termes familiers exploitant le plus souvent un certain nombre d'analogie avec le monde physique. Par exemple l'usage des métaphores temporelles comme le sablier ou l'horloge permettra de présenter à l'utilisateur une information facilement identifiable à un temps d'attente (Gronier & Gomri, 2008).

c. Approches esthétiques

Tufte & Graves-Morris, (1983) défendent une approche de conception basée sur l'esthétisme et un savoir-faire artistique. Il ne se base pas sur une approche empirique au contraire de Cleveland (voir approche psychophysique), mais propose une série de recommandations sur comment créer une conception efficace de représentations. Ces recommandations reposent pour beaucoup sur des jugements intuitifs.

Le premier grand principe qui dirige les recommandations de Tufte concerne le concept ratio encre/données. Ce concept renvoie au principe que plus une représentation graphique utilise de l'encre pour représenter les données, plutôt que pour visualiser les informations secondaires, plus la représentation sera efficace. Le second principe est la densité de données sur un graphique. Plus la densité de données est importante sur le graphique, par rapport à la représentation totale de la représentation graphique, plus la représentation sera efficace et pertinente. Le troisième principe concerne le niveau d'épure de la représentation. Tufte recommande d'éliminer les structures du graphique qui ne sont pas pertinentes (décorations, motifs, superflus) et qui vont interagir avec l'attention du lecteur.

Les principales limites à cette approche résident là encore dans l'absence de prise en considération du domaine de travail et dans la manière de traduire la sémantique du domaine de travail à travers la représentation visuelle.

d. Psychophysiques

Le but de cette approche de conception, développée par Cleveland & McGill, (1984), est de développer une approche scientifique pour représenter graphiquement les données. C'est une approche dyadique, la relation principale est la relation entre les propriétés

physiques des représentations et les capacités perceptives des observateurs (leurs capacités à extraire des informations quantitatives de ces représentations). Cleveland & McGill, (1984) vont mener une démarche d'évaluation empirique entre plusieurs caractéristiques visuelles pour la construction de représentations visuelles. Ils vont ainsi montrer empiriquement le lien entre ces choix et les performances des opérateurs. Par exemple, les auteurs démontrent qu'il serait préférable d'utiliser un graphique en barres plutôt qu'un graphique circulaire, car il implique un jugement de position pour une même échelle de mesure.

Cette approche présente d'intéressantes données pour choisir entre plusieurs formats de représentations de base. Néanmoins elle présente plusieurs failles notamment celle d'être limitée pour le choix de représentations analogiques plus complexe (voir technique de l'affichage par configuration). De plus, en étant clairement une approche orientée sur la paire représentation/humain, elle ignore l'aspect fondamental qu'est l'interaction avec le domaine de travail.

e. Attention visuelle et perception

La dernière des perspectives est probablement celle qui s'accorde le plus avec la conception de forme géométrique analogique. Cette structure visuelle est particulièrement pertinente dans le cas de domaine de travail dirigé par les lois de l'environnement (Bennett & Flach, 2011). La perception des objets joue un rôle dans les processus d'attention visuelle et de perception des formes (Pomerantz & Schwaizberg, 1975). Les lois de la Gestalt sur la proximité, la similarité, la fermeture, la bonne continuation et la symétrie sont reliées à l'idée de regroupement perceptuel pour la constitution de représentation graphique.

La loi de proximité renvoie au fait que les parties d'un tout qui sont physiquement proches tendront à être regroupées ensemble (Figure 16 a). La loi de similarité renvoie au fait que les similarités physiques tendent à être regroupées ensemble. (Figure 16 b). La loi de fermeture reporte au fait que quand les éléments sont arrangés de manière à représenter une région fermée, ils seront regroupés pour visuellement représenter une forme unifiée (Figure 16 c). La loi de bonne continuation se réfère au fait que la trajectoire des graphiques peut avoir une influence sur le regroupement perceptif (Figure 16 d)

La loi de symétrie indique que quand des parties ont une relation visuelle symétrique, ces parties sont probablement regroupées ensemble (Figure 16 e).

Les éléments graphiques sont perçus comme des objets perceptuels, basés sur les lois de regroupement favorisant le traitement automatique et en parallèle de l'information. Le second aspect théorique repose sur le rôle très important de la dimension configurable des stimuli et des caractéristiques qui émergent du stimulus.

Ainsi si les propriétés émergentes produites par l'interface sont saillantes et indiquent à l'observateur quelque chose dont il a besoin de savoir pour accomplir la tâche, les performances sur les tâches d'attentions divisées seront meilleures. Néanmoins les

propriétés émergentes ne sont pas facilement mesurables et prévisibles. De plus, ces caractéristiques émergentes émergent directement du domaine de travail. Ainsi la qualité dans la cartographie entre les caractéristiques émergentes et les propriétés du domaine qu'ils représentent, introduisent une considération additionnelle, mais critique dans la conception.

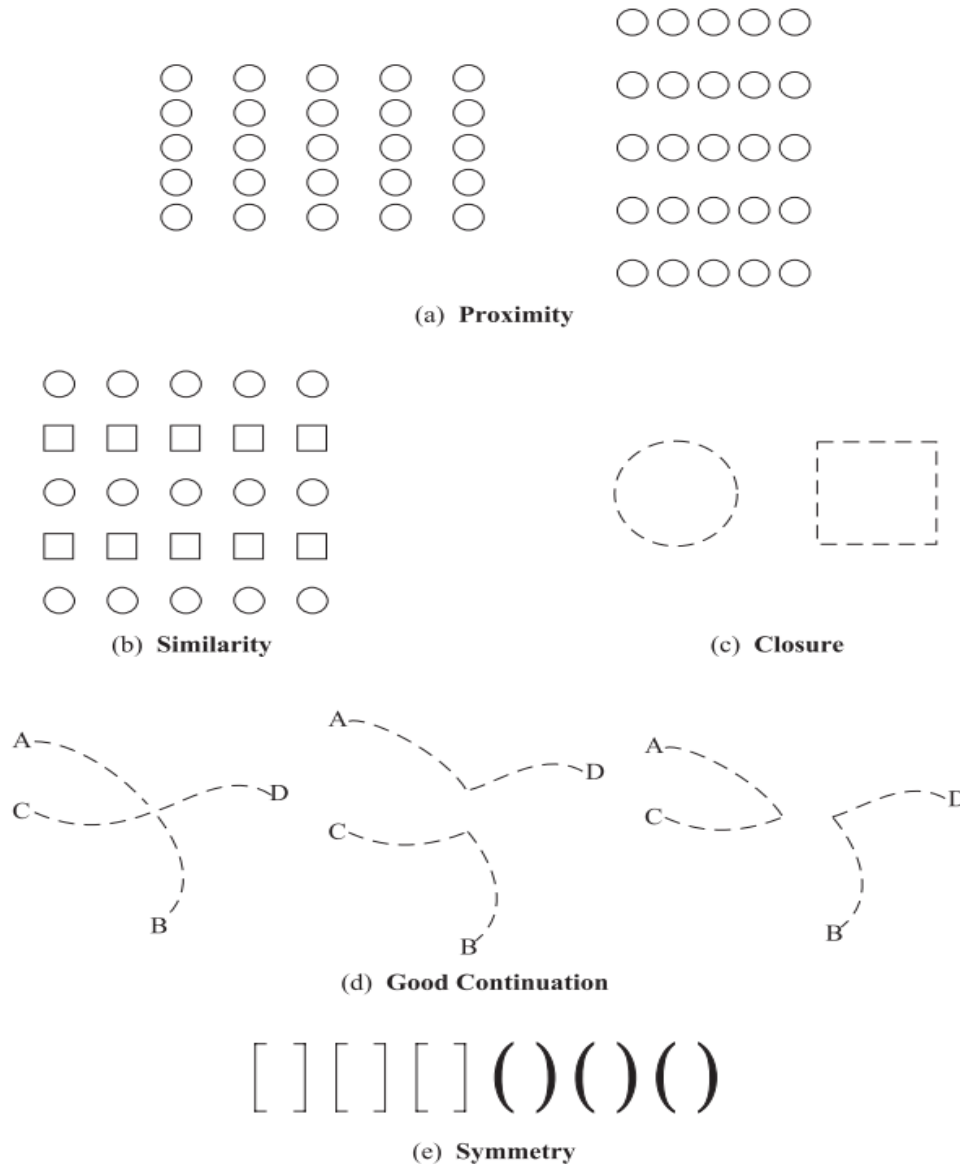


Figure 16 : loi de la gestalt (Bennett & Flach, 2011)

2.2.2. Du concept à un ensemble d'objets graphiques perceptifs

La plupart des concepts cités précédemment ont permis de faire émerger des règles de construction ou d'orienter la conception vers certains objets visuels. Ces objets graphiques vont permettre de faire un lien perceptif entre le domaine de travail et l'humain.

Dans la suite de ce chapitre, nous ferons un tour d'horizon des représentations visuelles fréquemment utilisées dans la conception d'interface écologique, sans prétention à une exhaustivité. L'objectif est de présenter les bases d'une librairie d'objets visuels associée à des bonnes pratiques de conception d'objets graphiques (Vicente, 2002).

Puis dans un second temps, nous verrons comment dans la littérature ces représentations sont associées à des variables issues de l'analyse du domaine de travail.

a. Un ensemble de représentations écologiques

▪ Les représentations graphiques primaires

Dans une première série de représentation, nous présenterons les représentations graphiques individuelles pour lesquelles du sens se dégagent directement de la représentation. En cas de mise en relation entre plusieurs éléments un second type de représentation graphique sera privilégié, le but étant de favoriser la perception liant ces différentes données.

- Affichage digital :

Le premier type de représentation graphique individuel est l'affichage digitale, il est de nos jours un des modes d'affichages les plus courants qui puissent exister. Avec cet objet (Figure 17), la valeur actuelle est montrée précisément et les limites peuvent être montrées numériquement ou indirectement à travers un second codage par exemple un codage couleur. Néanmoins, il n'y a pas de perception directe des relations qui peuvent exister entre plusieurs données digitales.



Figure 17 : Affichage digital

- Affichage symbolique

Dans ce type d'affichage individuel, la variable est montrée à travers une cartographie symbolique. La Figure 18 illustre une représentation symbolique dans une interface de commande de l'armée. Le symbole utilisé dans cette interface représente le type d'unité militaire pour lequel les variables s'appliquent en ce moment. Les symboles peuvent également être utilisés pour représenter les états normaux et anormaux définis par des seuils, par exemple en utilisant un codage couleur (exemple : vert = état normal, orange=seuil pré critique, rouge = alarme).

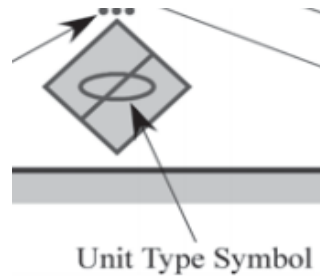


Figure 18 : Symbole

- Positionnement d'une représentation graphique par rapport à un référentiel.

Les représentations suivantes cherchent à positionner une donnée ou plusieurs par rapport à un cadre de référence. Elles vont donc permettre de situer les données au vu de référence tel le positionnement d'une température par rapport à une échelle de température.

- Le graphique à barres

Cet objet a pour but de visualiser la valeur d'une variable par rapport à un cadre de référence comme une échelle de volume ou de débit. Généralement la limite basse et la limite haute sont indiquées par un code couleur, où un repère visuellement perceptif. Le sommet du rectangle bleu représente la valeur de la variable à l'instant présent. La Figure 19 illustre le barre graphe dans la conception d'interfaces écologiques, il est utilisé pour indiquer le niveau d'eau dans une vanne.

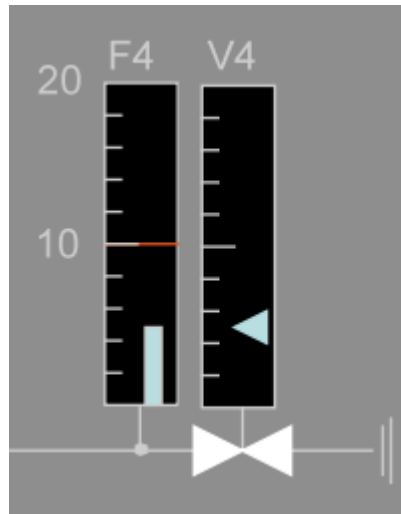


Figure 19 : Barre graphe (Jamieson et al., 2001)

- La règle ou la ligne de graduation:

La Figure 20 illustre une règle avec une unité X allant de 0 à 6. Cette représentation est unidimensionnelle.

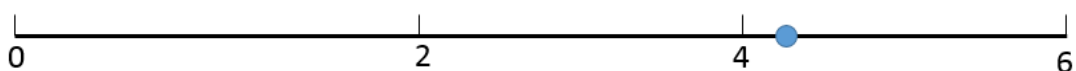


Figure 20 : La règle ou ligne de graduation

- La règle où la zone de bon fonctionnement sert de point critique à surveiller

Cet objet permet de repérer l'état normal ou anormal d'un système. Le positionnement par rapport à une zone de valeur, jugé comme satisfaisant permet à l'opérateur de juger de l'état de la variable. Sur la Figure 21 le point central est une zone allant de 0 à 2, représentée par la couleur verte, plus la valeur de la variable est éloignée de cette zone centrale plus le processus est dans un état anormal.



Figure 21 : La règle avec un intervalle de valeur normale est le point central à surveiller

- Le graphique circulaire

Cet objet est caractérisé par les coordonnées polaires ou les degrés d'arc de cercle plutôt qu'une échelle linéaire. La Figure 22 par la surface du cercle représente le taux d'emprunt. Ce type de représentation sera particulièrement utilisé pour représenter un positionnement relatif.



Figure 22 : Diagramme circulaire (Billet et Morineau, 2005)

- Les graphiques temporels

Les graphiques temporels permettent de suivre l'évolution de paramètres du processus, d'en prévoir la tendance et la vitesse de variation. Ils permettent de comparer l'état d'une variable par rapport à un référentiel qu'est le temps. Il existe plusieurs manières de représenter l'évolution d'une variable à travers le temps. La principale est le graphique conventionnel en 2D (Figure 23). On appelle couramment ce type de représentation « vue tendance » ou « trend ». Il importera que la base de temps soit compatible avec les besoins de l'opérateur. Cet affichage facilite le contrôle d'un procédé par anticipation, de nombreuses études ergonomiques l'ayant démontrées (Kolski, De Keyser, & Millot, 1993).

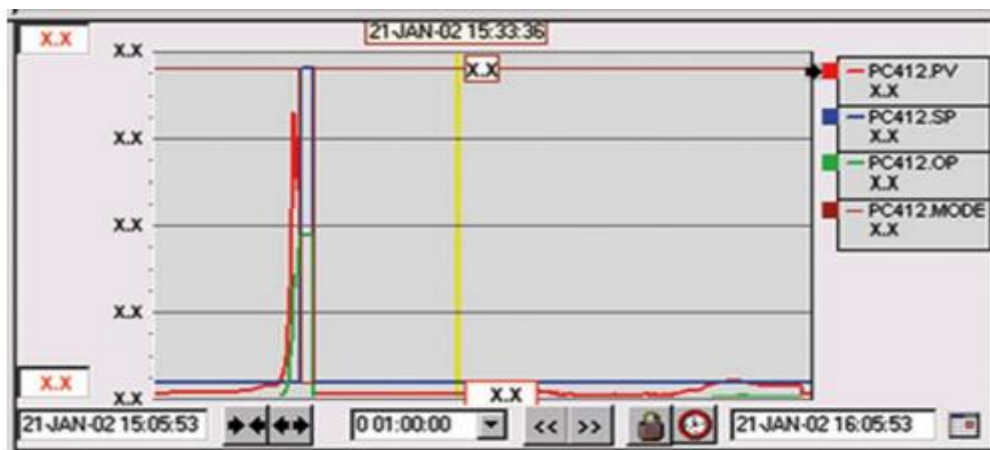


Figure 23 : Graphique temporel (Jamieson et al, 2007)

- L'utilisation de flèche

Cet objet graphique peut également être utilisé pour indiquer l'évolution d'une variable dans le temps. Le sens de la flèche donne la tendance de la variable.

- La technique de la trace temporelle

Ce type de représentation (Figure 24) est assez semblable à l'utilisation de la flèche, car elle permet également d'indiquer la tendance. Il s'agit de laisser une trace physique à l'écran de l'évolution temporelle d'une variable. Pour cela on trace visuellement à l'écran une trainée entre la valeur de la variable au temps n et la valeur de la variable à $n-1$. $n-1$ étant un temps préalablement défini qui évolue en fonction du temps tout comme n .

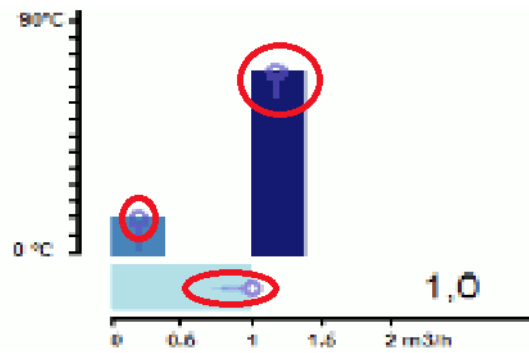


Figure 24 : Trace temporelle

- Représentations graphiques positionnant des données entre elles

- Le graphique à barres connectées

Cet objet est une variante du graphique à barres. Les barres sont connectées les unes aux autres pour montrer la relation entre une ou plusieurs variables (Figure 25).



Figure 25 : Barre graphe reliée (Jamieson & Vicente, 2001)

- L'entonnoir

Cet objet (Figure 26) est une technique de représentation très proche au graphique à barres connectées, elle permet de renforcer l'idée d'une évolution d'une quantité à travers les différentes représentations en barres. Ce type de représentation est intéressant pour fournir des informations sur une évolution de masse à travers un système (C. M. Burns & Vicente, 1995). La principale différence avec le graphique à barre reliée réside dans le coloriage du volume entre les barres.

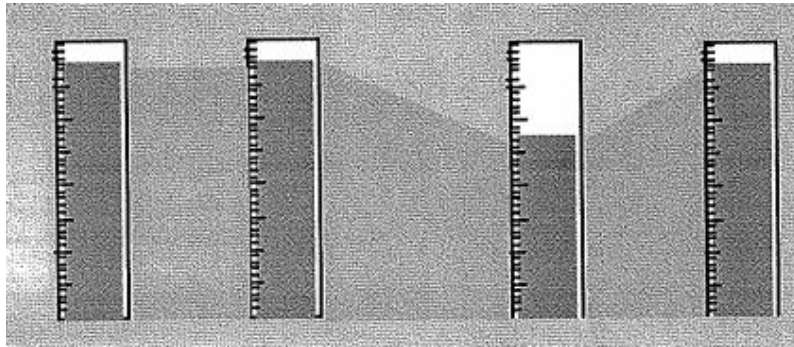


Figure 26 : Affichage en entonnoir (C. M. Burns & Vicente, 1995)

- Les règles connectées :

Cet objet est représenté par plusieurs règles qui sont connectées ensemble par une ligne représentant leurs valeurs actuelles. La Figure 27 illustre cela pour le cas d'une centrale nucléaire. Chaque règle donne la température d'un réacteur. La courbe reliant les différentes règles donne la tendance du delta de température (jauge de couleur verte) dans le dernier réacteur.

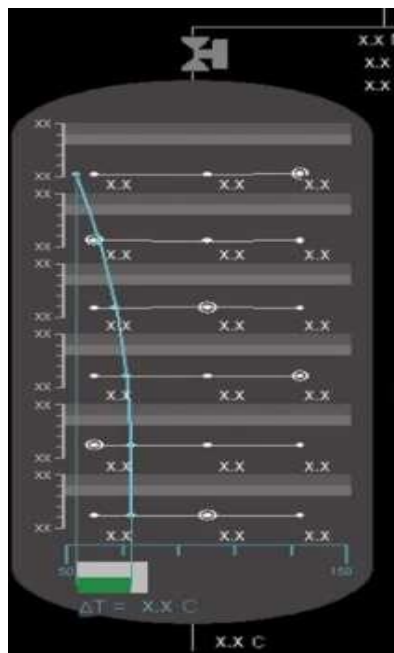


Figure 27 : Règles connectées (Jamieson et al., 2007)

- Le graphique à barres sommatif et soustractif :

Cet objet est une variante du graphique à barres où cette fois-ci les variables sont représentées par une superposition de graphiques à barres. Ce type de représentation va positionner des données par rapport à d'autres données en fonction des relations mathématiques « additives ou soustractives ». La hauteur totale des barres représente la somme des variables présentes dans le graphique à barres sommatif. La Figure 28 est un exemple de ce mécanisme, les variables X1, X2 et X3 sont représentées chacune par une barre. L'échelle de droite va montrer la somme totale de ces trois variables. La figure à droite représente une barre graphe représentant un graphique à barres soustractif où le

principe est cette fois que l'on a une valeur X_1 de départ à laquelle l'on va soustraire des valeurs respectivement ici les variables X_2 , X_3 et X_4 pour obtenir la valeur finale X .

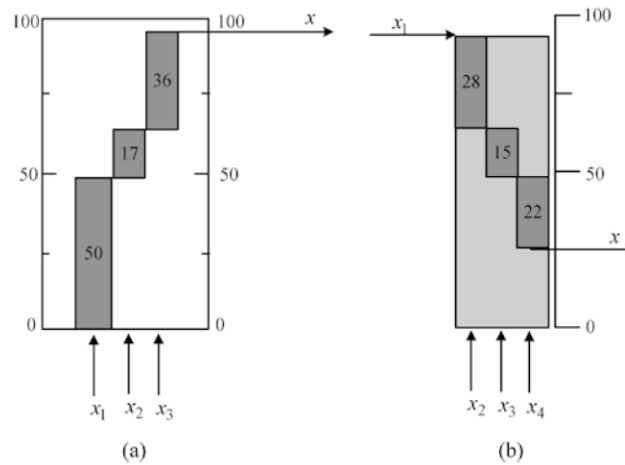


Figure 28 : Graphique à barres sommatif (Liu et al., 2002a)

- Les lignes traductrices

Cet objet graphique (Figure 29) utilise la position d'un point central pour représenter la valeur normale. Dès que ce point ne sera plus au milieu, le système sera alors dans un état anormal.



Figure 29 : Ligne traductrice (Burns et Al. 2012)

- La rotation de la ligne

Cette forme de représentation visuelle utilise l'orientation de la ligne pour indiquer l'état normal ou anormal du système (Figure 29). Ce type de représentation peut être utilisé pour représenter une importante quantité de variables. On parlera alors de diagramme de données de masse. Ce type d'affichage a été appliqué à plusieurs reprises dans la conception d'interface (Jamieson & Vicente, 2001) (Burns & Vicente, 1995). La Figure 31 illustre une application du diagramme de données de masse. Ce type d'affichage va permettre de reconnaître très rapidement si une variable du système est anormale parmi une grande quantité d'autres variables (Beuthel, Boussoffara, Elzer, Zinser, & Tilssen, 1995). Néanmoins, elle ne permettra pas de répondre avec précision à qu'est-ce qui ne va pas, de plus ce type d'affichage ne met pas en avant la structure causale, ni la structure physique du processus auquel il est associé.

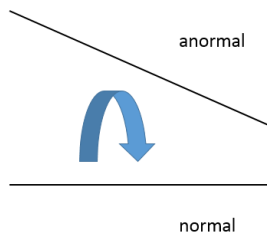


Figure 30 : Rotation de ligne

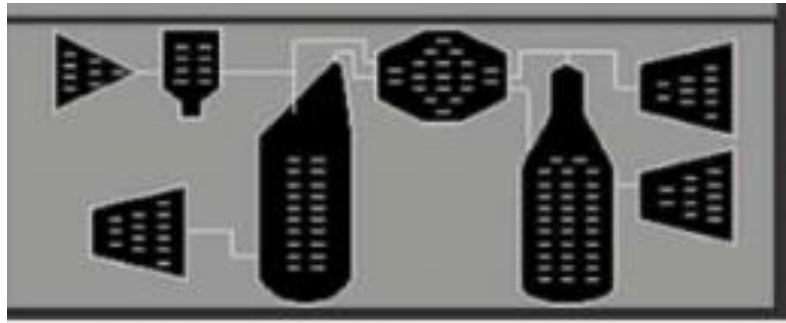


Figure 31 : Diagramme de données de masse (Jamieson et al, 2002)

- Le Nomogramme

Ce type de représentation graphique (Figure 32) permet de montrer la relation entre plusieurs variables en utilisant trois échelles et une ligne connectant ces différentes échelles. Ce terme inventé par Maurice d'Ocagne au début du 20^{ème} siècle s'expose sous la forme d'une multitude de déclinaisons possibles (nomogrammes à droite parallèles, nomogrammes de Clark, folium, abaquages...). Elle présente comme principal intérêt de permettre de résoudre des calculs graphiquement, en cela elle est vectrice d'une bonne perception directe du problème. Elle est donc un type de représentation particulièrement apprécié dans la conception écologique d'interface (Figure 33).

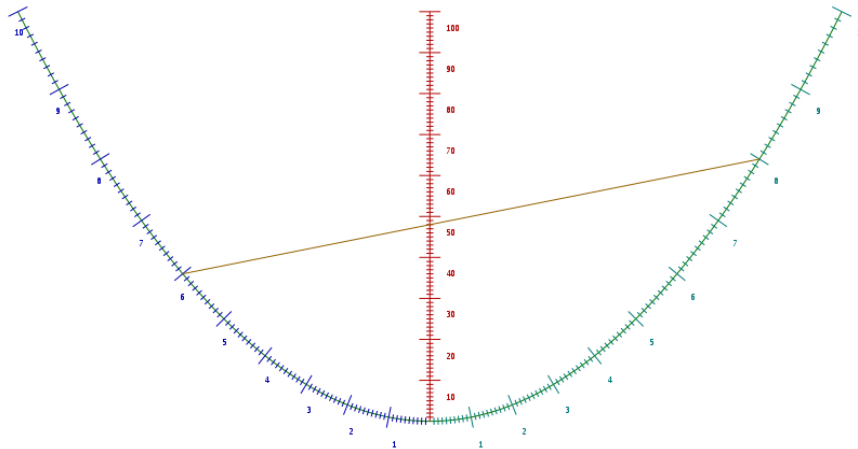


Figure 32 : Nomogramme (Alain Busser)

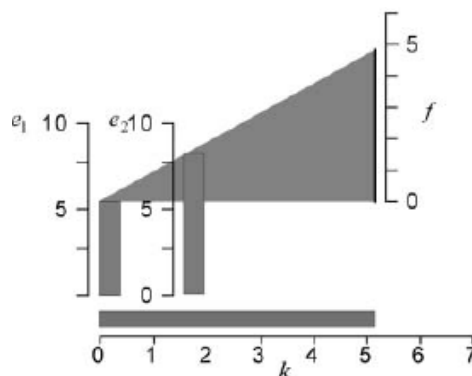


Figure 33 : Nomogramme utilisé dans une interface écologique (Liu et al., 2002a)

- La technique trigonométrique

Cette technique de représentation graphique utilise les lois de la trigonométrie. L'usage d'un triangle va favoriser la perception directe des relations unissant les différentes variables. L'augmentation de y ou/et de x va modifier z . La Figure 34 illustre la représentation à travers l'utilisation de la trigonométrie. L'angle θ est donné par la longueur de a et de b . L'angle θ va permettre de déterminer la hauteur c .

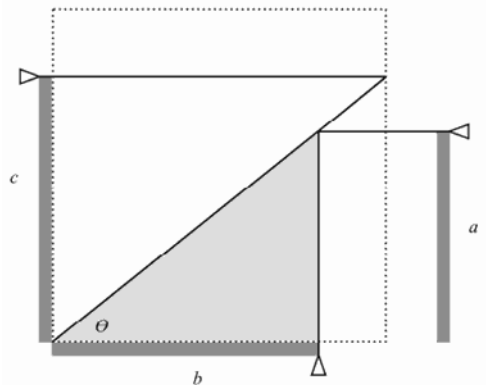


Figure 34 : Représentation basée sur les principes de la trigonométrie (Kan & Jamieson, 2012)

- L'affichage par configuration

Cet affichage a été introduit par Bennett & Flach, (1992). Il propose de regrouper entre elles plusieurs représentations fonctionnelles en montrant graphiquement les liens qui unissent toutes ces représentations. La Figure 35 est une représentation de configuration. L'approche des affichages par configuration répond au fait qu'il soit très difficile de représenter individuellement toutes les représentations fonctionnelles une par une, car l'espace à l'écran est réduit. Et il est difficile pour l'opérateur de comprendre efficacement tous les liens qui unissent toutes les représentations fonctionnelles individuelles.

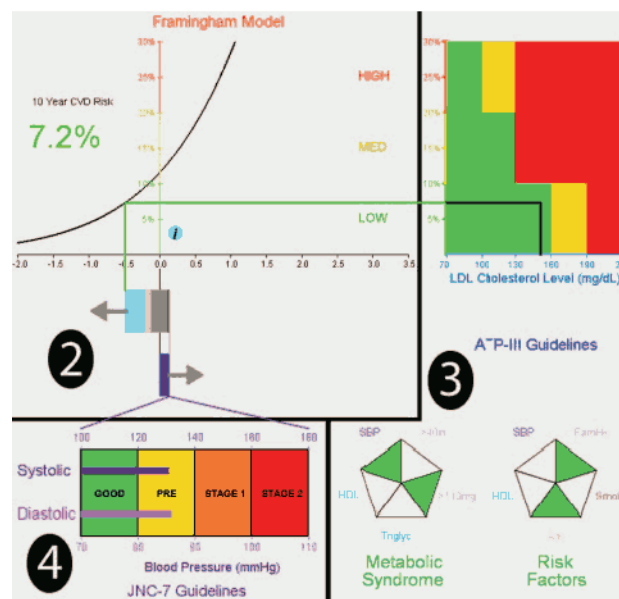


Figure 35 : Représentation configurationnelles, (McEwen et al., 2014)

McEwen et al., (2014) dans le domaine médical ont proposé une représentation par configuration où des liens entre les différentes représentations fonctionnelles sont représentés par des traits de couleur verte et violette, par exemple le lien entre le taux de cholestérol et le modèle de Framingham. Ce modèle a pour but d'estimer le risque cardiovasculaire d'un sujet pour la décennie prochaine. Les liens entre le cholestérol et l'évolution du modèle de Framingham sont mis en avant par une meilleure perception directe de l'information.

- Technique du tunnel temporel

Cette technique est une approche de conception qui combine les représentations des graphiques temporelles et l'approche par configuration. Cette technique correspond à la 7e heuristique des recommandations de Hansen, (1995) pour la réalisation d'une bonne cartographie sémantique. La cartographie sémantique (Dal Vernon & Sanderson, 1998) a comme objectif de convertir un champ de connaissances en un ensemble d'objets graphiques le plus perceptivement possible.

Cette technique implique une échelle de forme géométrique, selon les lois de la perspective en géométrie. Ensuite, elle implique une présentation des variables dans le plan en profondeur. À la fin, l'on obtient une représentation en 3 dimensions qui fournit une trace des niveaux les plus anciens de données et les propriétés les plus récentes dans le temps, le tout intégré dans une représentation par configuration. La Figure 36 applique cette technique à une représentation par configuration. Une grille en perspective est fixée dans le plan en profondeur du réservoir. Les rectangles les plus à l'extérieur représentent la valeur temporelle actuelle, les rectangles les plus au centre correspondent aux valeurs temporelles les plus anciennes. Chaque rectangle successif est mis à l'échelle selon les lois de la perspective et la variation des valeurs est tracée par la connexion des différentes valeurs associées à chaque rectangle dans le plan en profondeur.

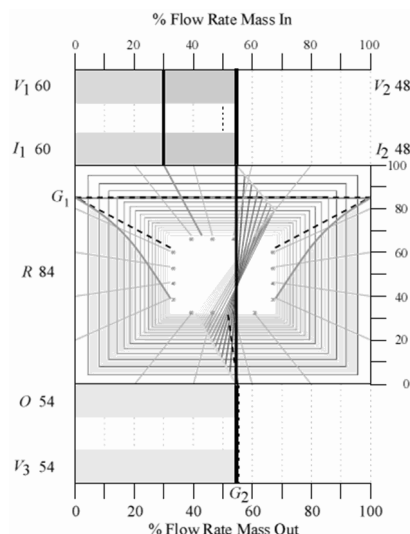


Figure 36 : Technique du tunnel temporel (Bennett & Flach, 2011)

Une variante à la technique du tunnel temporel a été proposée dans la littérature (D. S. Hall et al., 2012). La perspective est également utilisée pour afficher la grille des courbes temporelles. La valeur la plus récente est à droite du graphique et dans la profondeur à gauche, l'on retrouve l'historique de l'évolution de la variable (Figure 37).

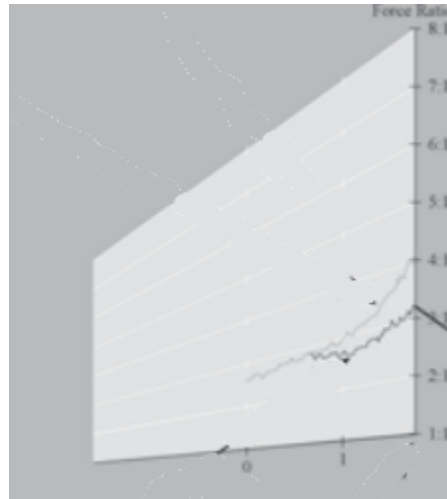


Figure 37 : Variante du tunnel temporel (D. S. Hall et al., 2012)

- Affichage en étoile

Cet objet visualise l'état de plusieurs variables simultanément par rapport à un état dit normal de ces variables. Ce type de représentation montre une meilleure identification de l'état anormal (Kolski, 1997). Cette forme d'affichage est intéressante, car elle se fonde sur le fait que les opérateurs discriminent très rapidement des états anormaux du processus en se référant à des patterns, prenant le plus souvent l'allure de figures se détachant sur un fond (Kolski, 1997). L'affichage par déformation est donc adapté à la surveillance d'un ensemble restreint de variables et à la détection d'un événement anormal par comparaison à un pattern. Dans la Figure 38, la variable delta T est dans un état anormal.

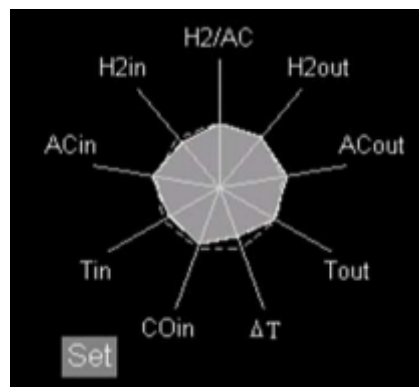


Figure 38 : Affichage en étoile, (Jamieson, 2007)

- Variables avec un arrière-plan de contraintes

Un des précurseurs pour ce type d'affichage a été Beltracchi, (1995). Les valeurs des variables sont affichées sur un arrière-plan contextuel. Cela permet de fournir une information immédiate sur l'état du système sans avoir besoin de vérifier l'état de valeur.

Le cycle de Rankine utilisé dans la Figure 39 illustre cette forme de représentation où le synoptique du circuit est affiché en arrière-fond du graphique de température.

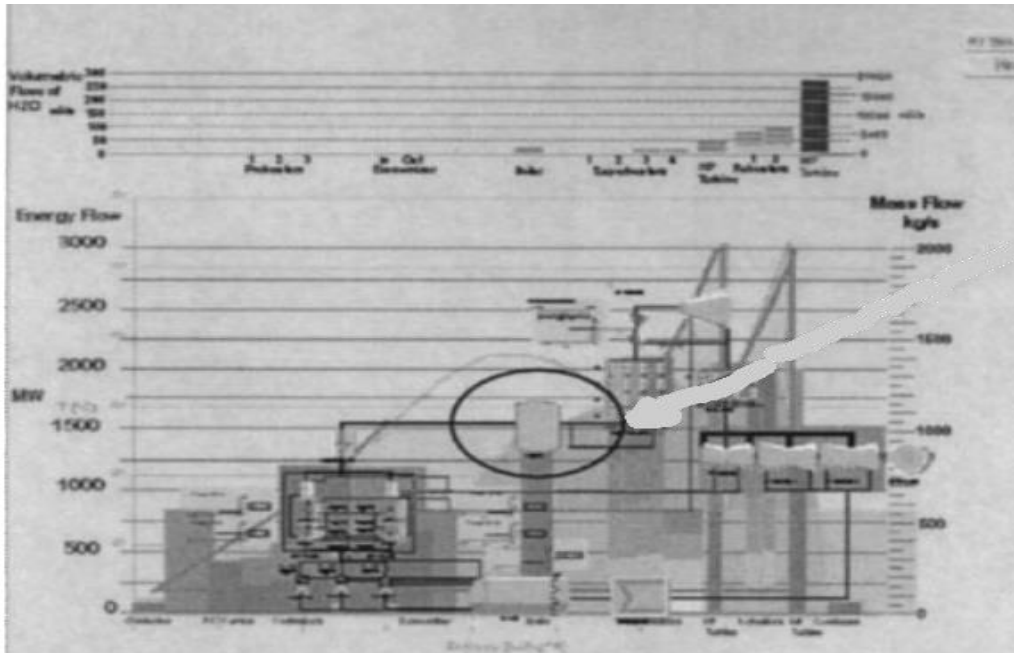


Figure 39 : Cycle de Rankine (Catherine M. Burns, 2000a)

- L'affichage de Paulsen

Ce type de représentation (Paulsen, 1992) est une technique qui consiste à montrer sous forme d'un fil l'ensemble des composants dans le but de donner une vue d'ensemble du processus. Dans la partie supérieure de ce type de figure, l'on retrouve un graphique sur les données de haut niveau, et dans le bas, le déroulé du système physique (Figure 40). Ce type de représentation permet de voir l'évolution d'un processus à travers son système physique.

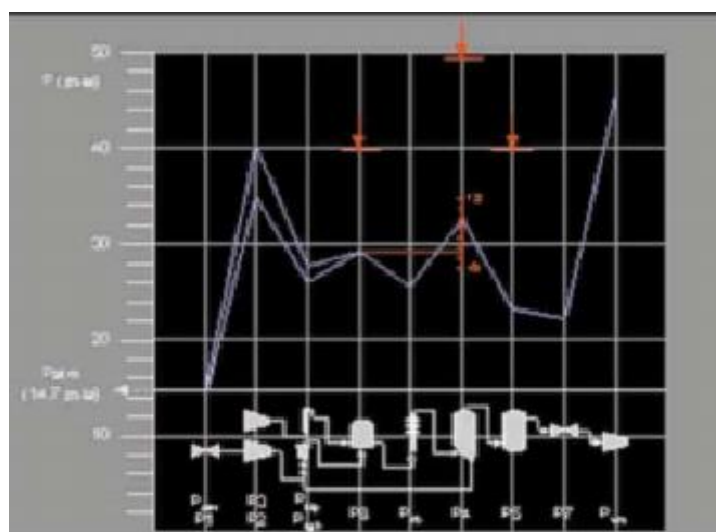


Figure 40 : Paulsen (Jamieson & Vicente, 2001)

- KWU display (C. M. Burns & Vicente, 1995)

Sur ce type de représentation, les valeurs d'un graphique sont affichées sur un arrière-fond représentant les contraintes du système, en cela il se rapproche du graphique avec arrière-plan proposé par Beltracchi, (1995). Néanmoins les contraintes sont des contraintes de haut niveau. Ce sont par exemple dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** les taux limites de cholestérol dans le sang. Le vert correspond à un taux de cholestérol normal, en orange le taux de cholestérol est critique, en rouge le taux de cholestérol est très dangereux pour la santé du sujet.

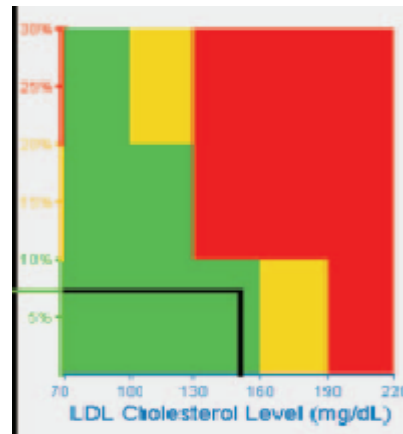


Figure 41 : Affichage de type KWU

2.3. Le choix de la représentation

Burns & Hajdukiewicz, (2013) proposent une classification de ces représentations en fonction des besoins d'affichage. Cette classification s'organise selon la présence de variables individuelles (Tableau 7), multiples (Tableau 8), ou face à un besoin de représenter des liens moyens-fins (Tableau 9). L'intérêt majeur de cette classification est d'offrir au concepteur un outil d'aide pour le choix des représentations. Néanmoins, pour la conception d'une interface écologique et donc la retranscription visuelle de tous les inputs issus d'une analyse de domaine de travail, reste au concepteur une très grande part de créativité et de jugement dans la représentation des liens moyens-fins qui unissent les différents niveaux d'abstractions. De même, pour la construction de certaines représentations comme les représentations par configuration, une grande part de créativité reste nécessaire pour le concepteur, car la construction dépend du résultat de l'analyse.

Tableau 7 : Affichage des variables individuelles (traduit de l'anglais Burns & Hajdukiewicz, 2013)

Besoin d'affichage	Options d'affichages	Figures	Meilleure utilisation	Limite principale
Variables compris l'intérieur de limites	Barre graphe	Figure 19	Contexte	Précision dans la lecture
	Mètre	Figure 20	Précision dans la lecture	Contexte
	Affichage digital	Figure 17	Précision dans la lecture	Contexte
	Analogique + affichage digital	Fournis des données numériques dans le contexte de l'état général de la variable	Précision dans la lecture + contexte	Espace
	Affichage symbolique	Figure 18	Espace serré	Apprentissage de la signification
Variables avec une contrainte	Graphique circulaire	Figure 22	Proportions, fractions	Précision dans la lecture
	Barre graphe	Figure 19	Distance aux limites	Précision dans la lecture
Variable où la valeur normale est critique à surveiller	Mètre	Figure 20	Distance aux limites	Normalisation de l'échelle
	Symbole	Figure 18	Alarmes	Signification précise
	Ligne de traduction	Figure 29	Détection de fautes	Précision dans la lecture
	Ligne pivotante	Figure 30	Détection de fautes	Problème à 180 degrés
Variables changeant avec le temps	Graphique	Figure 23	Information historique	Besoin d'espace
Besoin d'affichage	Flèches	Symboles qui fournissent la direction sur l'évolution d'une variable	Direction du changement	Pattern de données

Tableau 8 : Variables multiples (Traduit de l'anglais Burns & Hajdukiewicz, 2013)

Besoin d'affichage	Options d'affichages	Description	Meilleure utilisation	Limite principale
Variable X = Variable Y (une variable équivaut à une autre variable)	Barre graphe connectée	Figure 25	Montre la déviance par rapport à l'équilibre	Précision dans la lecture
	Graphique temporel	Figure 23	Équilibre dans le temps	Précision dans la déviation
	Bar graphique sommatif	Figure 28	La lecture du x	La lecture des composants (y, z)
Variables additionnelles X=y+z	Nomographe	Figure 33	Calcul de nouvelles valeurs	Espace
	Graphique temporel sommatif	Comme un bar graphe sommatif, la différence est que les valeurs sont montrées à travers le temps	Résumé dans le temps	Espace et lisibilité
	Triangle graphique	Figure 34	Montre les relations complexes	Pas d'historique, besoin d'entraînement
	Nomographe	Figure 33	Lisibilité des composants (y,z)	Lecture de l'échelle de logarithme
Variables multiplicatives X= y*z	Affichage par configuration	Figure 35	État du système	Historique temporel, lisibilité, valeur individuelle
	Affichage en étoile	Figure 38	Normal/ anormal	Valeur extraite, historique temporel
Multiples variables déterminant l'état du système	Barre graphe avec caractéristique de graphique par configuration	Barre graphe où de multiples variables alignées montrent un pattern de données	Direction du changement	Précision de lecture
	Ligne graphe avec caractéristiques de graphique par configuration	Ligne graphe de multiples variables alignées. Elles peuvent être utilisées pour montrer un pattern de données	Lecture de séquence similaire	Précision de lecture
	Diagramme de données de masse	Figure 31	Grosse quantité de données	Historique temporel, précision de la lecture
	Métrique avec une proximité proche	Les variables sont montrées les une à côtés des autres si elles sont équilibrées par une valeur commune, la caractéristique émergente sera une ligne droite.	Même niveau de valeur	Historique
	Règles connectées ayant une valeur commune	Plusieurs règles sont liées ensemble par des lignes dessinées par leurs valeurs actuelles Figure 25	Montre la déviation	Historique
Équilibre entre de multiples variables	Règles connectées	Figure 39	Montre le contexte	Historique

Tableau 9 : représentation liens moyens-fins (traduit de l'anglais Burns & Hajdukiewicz, 2013)

Besoin d'affichage	Options d'affichages	Description	Meilleure utilisation
Structure linéaire	Lignes	Les lignes connectent une variété d'éléments de l'affichage, illustrant une relation ou structure causale.	Contexte
	Spirales	Ce sont des arcs de cercle qui diffèrent des lignes. Les spirales sont des courbes qui commencent en un point central puis s'en éloignent de plus en plus, en même temps qu'elle tourne autour. Une spirale se réfère à une courbe plane.	Classement de données
Structure spatiale	Carte	Utilisé pour montrer les couches de composants avec leur position actuelle dans le monde. Elles représentent le monde parfois en 2d ou en 3d.	Navigations, vue d'ensemble, localisation
	Matrices	Les matrices montrent un classement ordonné en 2D, qui peut refléter la position dans le monde ou toute variété de variables. Elles peuvent s'apparenter à un ensemble de liste structurée décrivant un environnement.	Structures à deux dimensions
Structure symbolique	Arbres	Utiliser pour afficher une hiérarchie, les structures peuvent avoir un point de départ et une fin qui sont représentés en haut et en bas de l'arbre	Hiérarchie
	Réseaux	Ils possèdent différentes interconnexions. Les niveaux ne sont pas définis. Elles désignent un ensemble de relations.	Réseaux
	Reproduction et autres diagrammes	Elles utilisent des symboles pour représenter les équipements et les connexions.	Montre les connexions entre les composants

Liu et al., (2002) ont proposé une méthode pour réduire la part de créativité artistique dans l'activité de conception d'interfaces écologiques en proposant une bibliothèque d'éléments graphiques préconstruits (Bennett & Flach, 2011). L'association entre l'analyse du domaine de travail et la forme visuelle de représentation ne se fait pas en fonction de la nature des variables, mais en fonction du type de processus (Figure 42). Un schéma fonctionnel est le point de départ de la conception visuelle de l'interface écologique. Le schéma fonctionnel correspond au troisième niveau de la hiérarchie d'abstraction (les fonctions généralisées ou processus). Il sert à décrire le processus sous forme d'un ensemble de processus primaires comme générer, stocker, transporter, transformer, équilibrer, limiter ou encore perdre.

Puis, dans un second temps, à chacun de ces processus primaires, l'analyste associe une formule mathématique illustrant la ou les variables impliquées par ce processus et les relations mathématiques qui les unissent. Enfin pour chaque processus primaire une ou plusieurs représentations visuelles, se basant sur les principes semantic mapping, existent pour représenter les variables et les liens qui les unissent. L'analyste n'a alors plus qu'à sélectionner la construction visuelle appropriée aux nombres de variables et à la relation mathématique liant les variables entre elles.

Cette technique utilise le principe de réutilisation de constructions graphiques à travers une bibliothèque et permet de garantir une conception écologique au concepteur

d'interface écologique. Cette méthode n'a, à notre connaissance, pas encore été implémenté dans une solution logiciel et reste donc cantonnée au domaine académique à défaut d'une plus large utilisation à un niveau industriel.

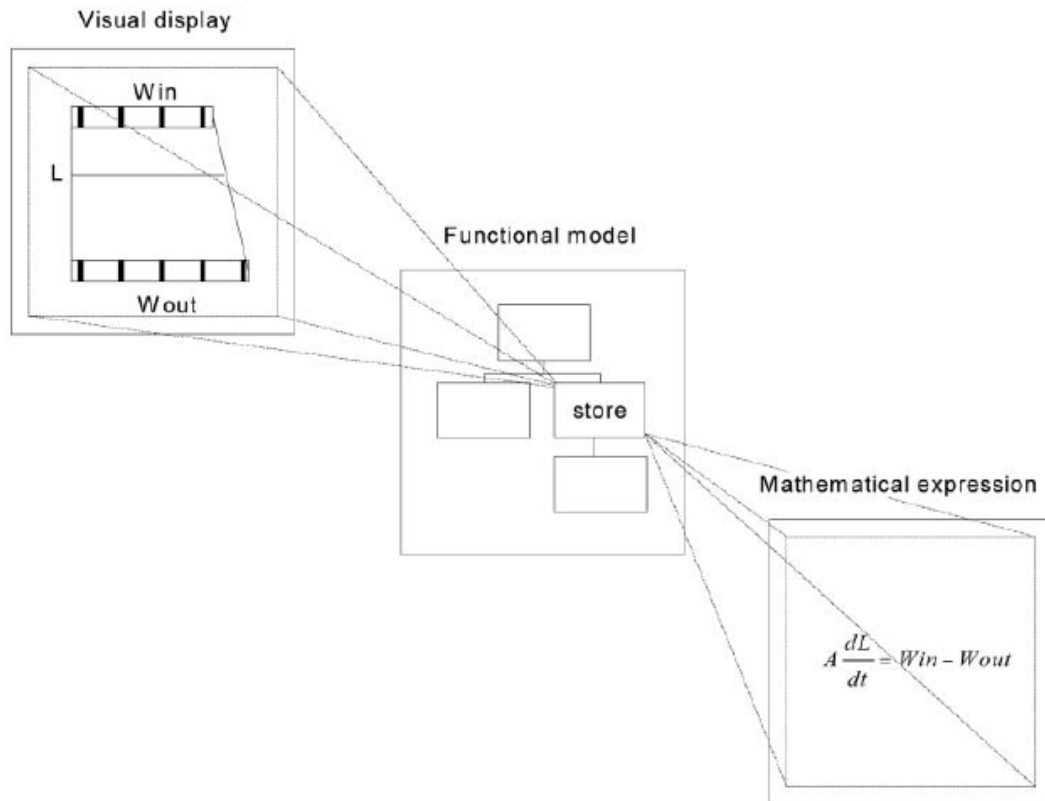


Figure 42 : Modèle du schéma fonctionnel pour la conception d'interface (Liu et al., 2002a)

3. D'une recherche académique à une implémentation industrielle, ou la difficulté de transformer l'essai

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons vu le besoin d'intégrer l'ergonomie dans la conception d'interfaces de contrôle commande. Nous y avons constaté les avantages d'une approche de conception : l'approche écologique. Ceci nous a conduit dans une deuxième partie à comprendre dans le détail ce qu'était cette approche triadique et les outils qui permettaient de concevoir une interface écologique. Nous présenterons dans une troisième partie, plus appliquée, plusieurs réalisations industrielles. Puis nous soulignerons plusieurs défis auxquels la conception d'interface écologique a répondu pleinement ou partiellement. Finalement, nous terminerons ce tour d'horizon par là où nous l'avons commencé à savoir le flot de conception Anaxagore.

3.1. Un tour d'horizon des interfaces écologiques

Read, Salmon, & Lenné, (2015) proposent un tour d'horizon des travaux sur les interfaces écologiques. Ces auteurs relèvent près de 59 travaux plus ou moins appliqués à la conception d'interfaces écologiques. Ils effectuent un classement de ces recherches selon le type de domaine concerné, à savoir, intentionnel ou causal.

La première interface écologique à avoir été réalisée fut DURESS (Dual Reservoir System Simulation). Cette interface portait sur un système de réservoir et de chauffage d'un circuit d'eau en centrale nucléaire. Cette interface a fait l'objet d'une dizaine d'études (Orchanian, Smahel, Howie, & Vicente, 1996) (Howie & Vicente, 1998) (C. A. Miller & Vicente, 2001). Une analyse complète du domaine de travail de DURESS a été réalisée (Vicente & Pawlak, 1994). Depuis le processus de conception écologique a été appliqué à de nombreux domaines, comme le transport, le contrôle commande d'opérations militaires, en passant par la santé ou encore l'industrie à fort volume de production. Pour le domaine de l'automobile Hilliard & Jamieson, (2008) et Stoner, Wiese, & Lee, (2003) ont développé des interfaces écologiques pour des voitures de course fonctionnant à l'énergie solaire. Ces interfaces intègrent un ensemble d'informations relatives à la gestion de l'énergie dans la voiture. Dans le même esprit, Young & Birrell, (2012) proposent une interface écologique basée sur l'analyse du domaine de travail automobile pour favoriser une conduite économique. Dans le domaine naval, peu de travaux ont été réalisés à notre connaissance. Les quelques travaux disponibles sont ceux de Chalmers, Burns, & Bryant, (2001) et de Park & Myung, (2012) portant respectivement sur la conception d'EID pour les situations de combats navals et la conception d'écrans radars navals. On retrouve également quelques recherches dans le domaine sous-marinier, mais ces travaux restent encore majoritairement confidentiels et donc difficiles d'accès (Judas et al., 2012).

Dans le domaine aéronautique, C. Borst, Sjer, Mulder, Van Paassen, & Mulder, (2008) proposent une interface écologique pour un système d'aide à l'atterrissage d'urgence pour les pilotes. Dans le domaine de la production énergétique, Drivalou & Marmaras, (2009) et Li, Sanderson, Memisevic, Wong, & Choudhury, (2006) se sont intéressés aux réseaux électriques. Lau et Jamieson, (2011) ont appliqué le concept des interfaces écologiques à des systèmes de réacteurs à bouilleur. Toujours dans le domaine industriel, Upton & Doherty, (2008) se sont intéressés à la faisabilité d'utiliser les EID dans les industries dites à haut volume de production. Dans le domaine de la robotique, Kaminka & Elmaliach, (2006) proposent une interface pour superviser plusieurs robots agissant simultanément, le but de cette interface est de résoudre la question d'une meilleure prise en considération de la coordination entre les robots avec l'utilisation d'une interface écologique par rapport à une interface conventionnelle. Pour le domaine de la finance, l'on retrouve les travaux de Morineau & Billet, (2007) ; Dainoff, Dainoff, & McFeeters, (2004) et de Achonu & Jamieson, (2003).

Enfin, le domaine de la santé n'est pas en reste. Il s'agit d'un domaine en pleine expansion, avec un fort accroissement technologique. Morineau, Morandi, Le Moëllic, & Jannin, (2013) ont travaillé sur l'analyse du domaine de la neurochirurgie pour guider la conception d'interfaces écologiques. Hall, Rudolph, & Cao, (2006) ont réalisé une analyse cognitive du travail pour le domaine de l'anesthésie médicale. Jiancaro, Jamieson, & Mihailidis, (2013) dresse de manière plus générale un état des lieux de l'utilisation de l'ingénierie cognitive dans le champ médical.

Globalement, on note que la conception d'interface écologique semble s'intégrer dans de plus en plus de contextes industriels et répond à une forte demande. Néanmoins, on constate que dans la plupart des cas, la conception de ces interfaces a été réalisée par des équipes de recherche déjà expertes dans ce type de conception. De plus, il n'est jamais précisé le temps de conception nécessaire pour aboutir à une interface écologique finale même si ce temps semble particulièrement long au vu du travail à fournir et dépendent de la taille et de la complexité du système à évaluer. Vicente, (2002) précise d'ailleurs que l'un des challenges de la conception des interfaces écologiques pour le futur est de chercher à réduire ce temps nécessaire à l'analyse à travers une meilleure intégration à l'échelle industrielle.

3.2. De nouvelles perspectives pour la conception écologique d'interface

Au-delà de ces approches aujourd'hui classiques des interfaces écologiques, plusieurs travaux ont abordé de nouvelles déclinaisons de la démarche.

3.2.1. *Des interfaces écologiques aux modalités perceptives variées*

Watson & Sanderson, (2007) proposent l'utilisation du son comme modalité perceptive pour l'interaction entre l'humain et le domaine de travail. En effet jusqu'à lors, seule l'utilisation de la modalité visuelle était utilisée pour représenter les contraintes de l'environnement. Ils vont proposer pour concevoir une interface écologique de supervision en anesthésie, d'utiliser des données physiologiques et de représenter l'information issue de l'analyse du domaine de travail à l'aide d'objets sonores. Ces objets sonores sont caractérisés par des critères comme le pitch, la clareté, le timbre, l'amplitude, la résonance, la réverbération, le vibrato ou le trémolo d'un ton. Burns, Ho, & Arrabito, (2011) démontrent que le choix de la modalité perceptive est important pour concevoir une interface écologique. Ils proposent un guide pour aider au choix de la modalité perceptive (visuelle, tactile ou sonore) à utiliser selon le type de besoin informationnel. (Tableau 10), puis l'applique à un système de contrôle de drone.

Tableau 10: Modalité perceptive (Burns et al., 2011)

Information Requirement	Visual	Auditory	Tactile
Iconic	Map to "looks like" icon	Map to "sounds like" icon	Map to "feels like" icon
Simple propositional (e.g. warning)	Map to colour or alert graphic.	Map to pitch or volume.	Map to duration and area, frequency and amplitude.
Complex propositional (message required)	Text message	Spoken message	Poor fit
1D Analogical	Map to location, length (e.g. bar graph)	Map to pitch, volume or tempo	1D tactile mapping (e.g. row of tactors)
2D Analogical	Map to location	2D localisation	2D tactile mapping
3D Analogical	Challenging. Likely requires rotation or remapping to 2D.	3D localization. May challenge localization abilities.	Challenging. Likely requires remapping to 2D.
Analogical with recall of past values	Trend chart	Poor fit	Poor fit
Continuous information	Manage through windows and navigation	Consider potential irritation	Consider adaptation
Intermittent information	Consider adding history	Consider adding history visually	Consider adding history visually

3.2.2. Des interfaces écologiques aux formats d'affichages divers

Le format de l'affichage est également une question importante avec la démultiplication des formats d'écrans. Du très grand écran de salle de commande aux espaces de visualisation très restreints (tablettes numériques, smartphones) en passant par des écrans d'ordinateur, plus conventionnels (écran 21 pouces), la palette d'espace de visualisation est importante. La question de l'intégration visuelle de l'information (voir page 48, chapitre 1) est un point important dans les principes sous-jacents à une bonne conception écologique. Mazaeva & Bisantz, (2014) ont mené des recherches sur les écrans de petite taille et ont comparé la conception d'une interface écologique en intégrant toutes les informations sur un écran par rapport à la représentation de l'information sur plusieurs écrans. Ils montrent que les performances des utilisateurs sont meilleures lorsque l'information est intégrée sur un même écran. Se basant sur ces résultats, ils proposent des recommandations pour la conception d'interfaces écologiques pour les écrans de petite taille comme les smartphones ou les écrans d'appareil photo.

La première de ces recommandations est que les concepteurs devraient regrouper les informations du système sur les écrans, sur la base des relations fonctionnelles du système. Il est préférable de concevoir un écran qui sera robuste et en mesure de faire face à la plupart des tâches que de développer un écran par tâche à réaliser.

La seconde recommandation est que les concepteurs se doivent de regrouper sur un écran les informations liées aux différents niveaux d'abstractions, sur la base des relations fonctionnelles, en s'appuyant sur la matrice de domaine de travail. Enfin la dernière recommandation est que les concepteurs doivent sélectionner un pattern de forme visuelle

homogène, pour la conception d'interfaces de petite taille, ce qui rejoint l'idée de proposer une bibliothèque de représentation écologique pour assurer des interfaces écologiques de bonne qualité.

Burns, (2000) a étudié la question de l'intégration de l'information et des différents niveaux d'abstraction à travers un ou plusieurs écrans. Elles montrent que pour obtenir des meilleures performances en termes de temps de détections d'erreurs, et de diagnostics de fautes, il faut idéalement favoriser une interface écologique avec à la fois un haut niveau de proximité spatiale et à la fois un fort niveau de proximité temporelle. La notion de proximité spatiale se définit par le fait que les éléments d'informations doivent être plus rapprochés spatialement. La notion de proximité temporelle est liée au timing de présentation de l'information. . Ainsi un haut niveau de proximité spatiale et un haut niveau de proximité temporel se traduisent par des informations proches spatialement et affichées en même temps. Appliqué à une interface écologique une forte proximité spatiale et une forte proximité temporelle se traduisent par un affichage de tous les niveaux d'abstraction au même temps et sur le même écran. Pour arriver à une telle représentation Burns, (2000) utilise la technique graphique du contexte en arrière-fond (Figure 43).

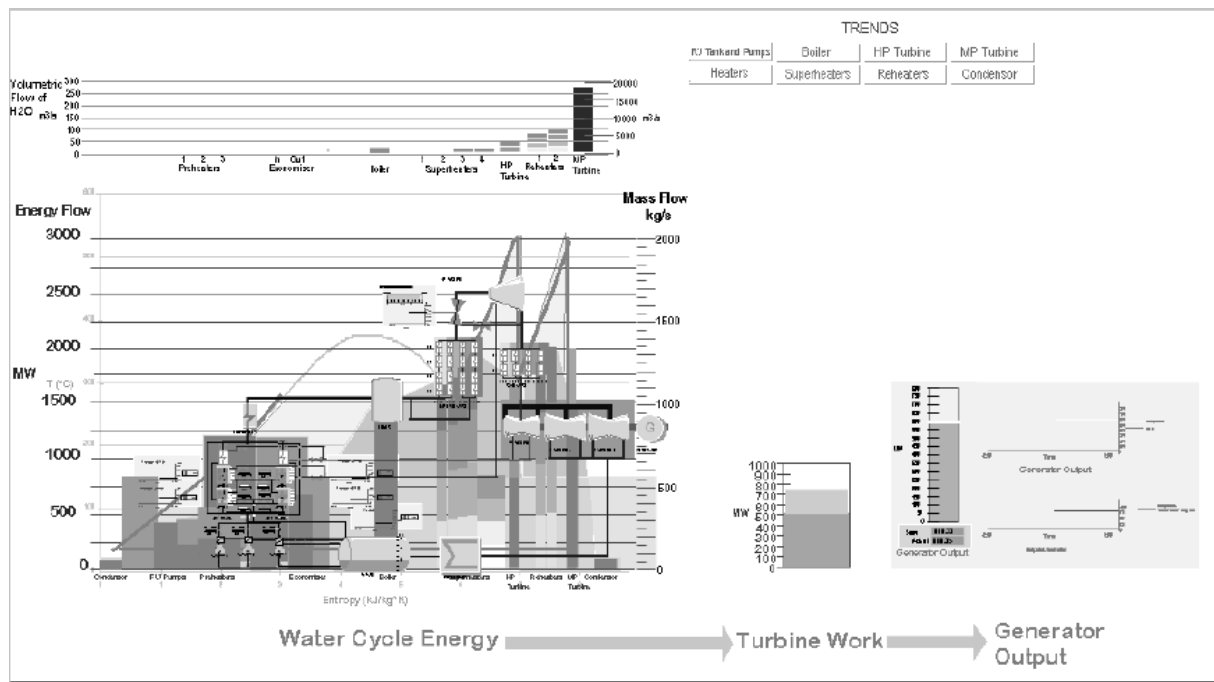


Figure 43: fort temporelle et spatiale intégration

Néanmoins la conception d'interface avec un haut niveau de proximité temporelle et spatiale est souvent difficile à réaliser. De manière plus globale, il est recommandé que la structure spatiale de l'organisation de l'information soit calquée sur la matrice de domaine de travail (Terrier, Cellier, & Carreras, 2001).

Jamieson & Vicente, (2001) se calquent sur la structure du domaine de travail. Néanmoins même si la structure du domaine est bonne, l'intégration temporelle de l'information au sens de Burns est en partie réduite. En effet, les auteurs utilisent deux écrans pour représenter l'ensemble des informations issues de la matrice. Toutes les

informations ne sont donc pas affichées au même moment. Cette interface a été conçue pour le contrôle des processus physico-chimiques. Le premier écran (Figure 44) intègre les informations de haut niveau. Les objectifs généraux sont représentés par la température à l'intérieur du réacteur visualisé par la technique du « mètre de connexion ». Les fonctions abstraites sont localisées sur la partie haute du premier écran allant du milieu à la partie droite de l'écran. Les auteurs utilisent différentes techniques de visualisation (diagramme en étoile, graphique en barres, approche par configuration). Enfin le niveau des processus se situe sur la ligne en bas de l'écran. Les techniques de visualisation employées sont la technique de Paulsen et l'utilisation de graphiques en barres.

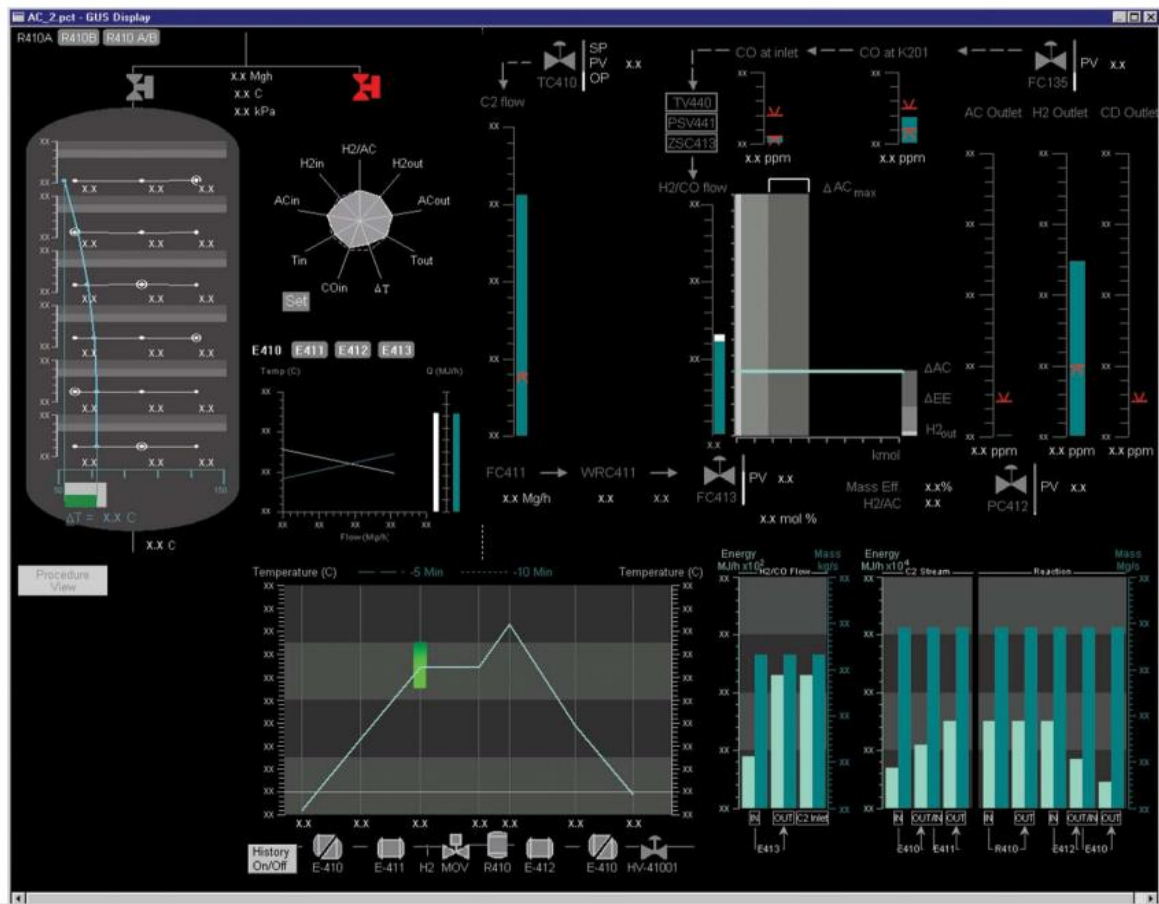


Figure 44 : interface écologique pour un contrôle de processus chimique (Jamieson, Miller, Ho, & Vicente, 2007)

La Figure 45 correspond au second écran. On retrouve sur cet écran les niveaux les plus bas de la hiérarchie d'abstraction. Les fonctions physiques sont représentées par un synoptique. Les informations sur la forme physique se retrouvent visuellement dans l'espace en bas à gauche et sont représentées par des informations numériques.

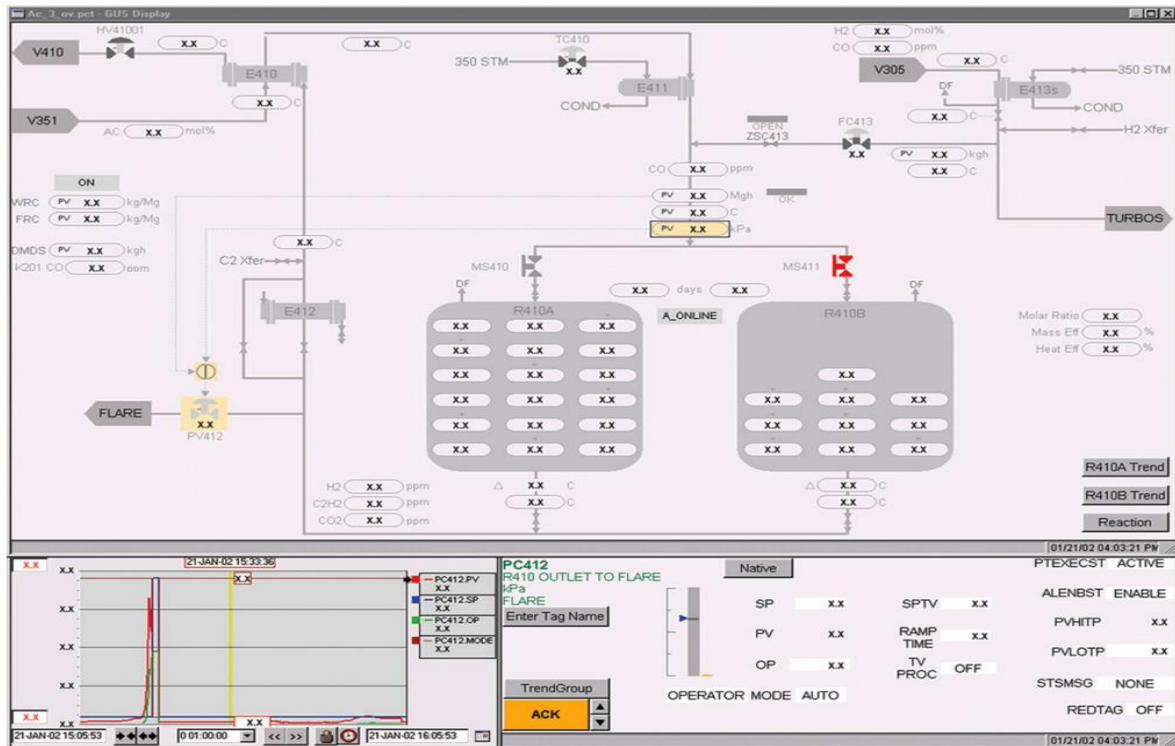


Figure 45 : Interface écologique pour un contrôle de processus chimique (Jamieson et al., 2007)

3.2.3. Des capteurs pour chaque information

Kim et al., (2012) ont proposé une architecture formelle à la conception d'interface écologique (Figure 46). Ce processus de conception recouvre l'ensemble des étapes vues précédemment (définition de la cible, l'analyse du domaine, la transformation des étapes en variable, les modalités de visualisation de l'information et le contrôle et l'évaluation de l'interface écologique produite). Néanmoins, un point n'a pas encore été évoqué, celui de l'analyse des variables disponibles. En effet les interfaces écologiques nécessitent de disposer de données sur une grande quantité de variables du processus. Données qui sont parfois disponibles grâce à des capteurs, mais parfois qui doivent être déduites ou dérivées d'autres données en particulier vraies pour les informations de haut niveau. Dans le contexte actuel du choix de l'instrumentation en capteurs des systèmes qui tend à viser le moindre coût, la question de la capacité des interfaces écologiques à faire face à ces problématiques de captures de l'information est importante.

Plusieurs raisons peuvent expliquer qu'une information que l'on souhaiterait sur l'interface écologique ne soit pas toujours affichée ou considérée comme fiable. La première est que l'information ne peut pas être mesurée soit parce que les instruments n'existent pas pour mesurer l'information souhaitée, soit parce que les outils de mesures existent, mais n'ont pas été installés à cause d'un problème de coût ou de son repositionnement dans le système. La seconde est que l'information est dérivée mathématiquement de niveaux plus bas et par conséquent dépend de la fiabilité de l'information de ces niveaux inférieurs.

Cependant ce type d'information peut ne pas être fiable ou peut être prise de capteurs distants qui ne sont pas forcément représentatifs.

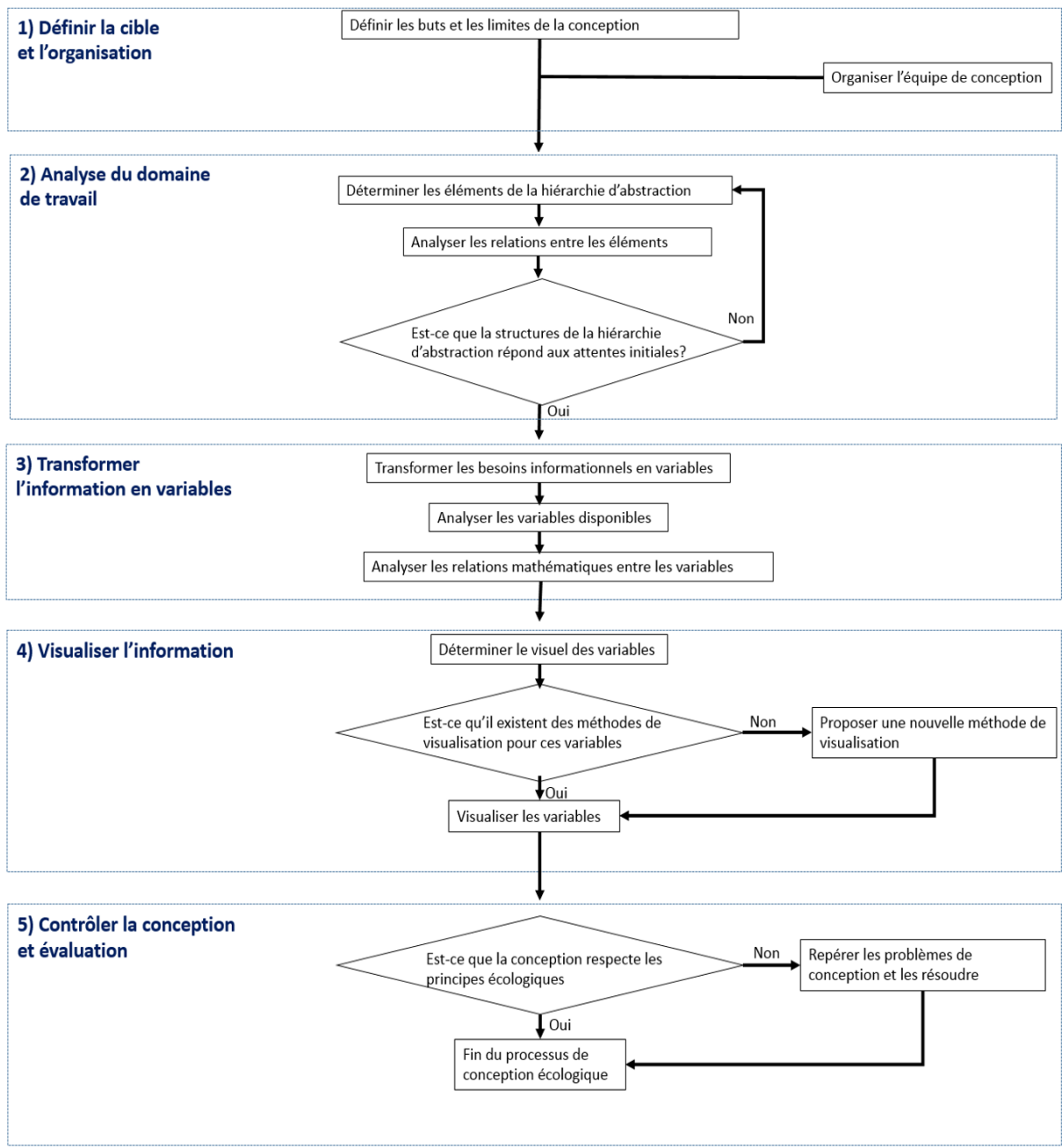


Figure 46 : Flot de conception générique d'une interface écologique (Ham et Al., 2012)

Dal Vernon & Sanderson, (2000) montrent que les interfaces écologiques sont effectivement plus performantes pour des tâches de détections de fautes de capteurs ou du système seulement et seulement si l'instrumentation est correctement constituée ou maximale.

Plus récemment, St-Cyr, Jamieson, & Vicente, (2013) ont démontré que la robustesse des interfaces écologiques n'était pas compromise par des problèmes de capteurs dont les données étaient plus ou moins erronées. Ils trouvent également des résultats allant dans le

sens contraire de l'expérience Dal Vernon & Sanderson, (2000) sur la sensibilité des interfaces écologiques aux problèmes de capteurs pour la détection de fautes. Néanmoins, les auteurs soulèvent eux aussi l'importance de la prise en considération des problèmes d'instrumentation.

Clark Borst, Flach, & Ellerbroek, (2014) mettent en avant la capacité des interfaces écologiques à faire ressortir les contraintes qui gouvernent un processus, ce qui en cas d'erreurs dans les informations d'un capteur permettrait de faire ressortir de manière plus marquée ce comportement incorrect en provenance du système ou du capteur. Les interfaces écologiques suggèrent une approche basée sur les contraintes qui représentent les interactions entre les composants et les fonctionnalités du système. Les contraintes forment alors un modèle des comportements attendus et des violations prévisibles d'un échec de capteur ou du système. Les fautes seront plus saillantes et s'afficheront comme une déviation de la normale ce qui facilitera leurs détections. Cette approche est différente de la majorité des systèmes où une faute de capteurs aura une signature différente d'un autre type d'erreurs tel des erreurs provenant du système. De plus, une bonne cartographie des contraintes assure une redondance de l'information, ce qui est consistant avec les modèles de contrôle analytique par redondance. La bonne création de la matrice du domaine de travail est donc primordiale pour pouvoir garantir un maximum d'efficacité pour l'opérateur humain face à des problèmes d'instrumentation incorrecte.

Dal Vernon & Sanderson, (2002a) proposent d'embellir le modèle d'analyse de domaine de travail (J. Rasmussen, 1985). Ils proposent de rajouter un système d'annotation dans le but de spécifier l'instrumentation nécessaire pour supporter les besoins informationnels de l'opérateur humain (Figure 47). Le système d'annotations de la hiérarchie d'abstraction aide l'analyste à considérer l'information que les opérateurs humains doivent avoir pour fournir un contrôle analytique de la redondance. Ainsi intervenue très tôt dans la conception, une analyse du domaine de travail enrichie d'informations sur l'instrumentation peut aider à influencer le choix des spécifications concernant les capteurs et instruments utiles à installer ou positionner sur le système. Dal Vernon & Sanderson, (2002b) suggèrent que de nouveaux critères, basés sur le besoin d'informations de haut niveau, dans les sciences de l'ingénieur spécialisé sur l'instrumentation, devraient être pris en considération en plus de ceux déjà existants.

La conception d'interface écologique a su répondre au cours de ces dernières décennies à de nombreux problèmes majeurs, mais comme pour sa capacité à faire face au défi lié à l'instrumentation, elle a également suscité plusieurs autres questions. La conception écologique offre une flexibilité dans la résolution de problèmes là où une approche classique va se concentrer à optimiser un comportement basé sur un modèle qui n'est pas toujours juste. La conception écologique va mettre le focus sur le contrôle de la structure du problème plutôt que le contrôle d'un comportement. Les interfaces écologiques semblent en mesure de répondre avec robustesse à toutes la variabilité des problèmes qui

peuvent survenir sur un process en particulier. Cela est important dans un contexte industriel où une catastrophe peut avoir de graves conséquences. L'importance de pouvoir répondre à tous les types de problème même ceux non prévus nous semble capitale.

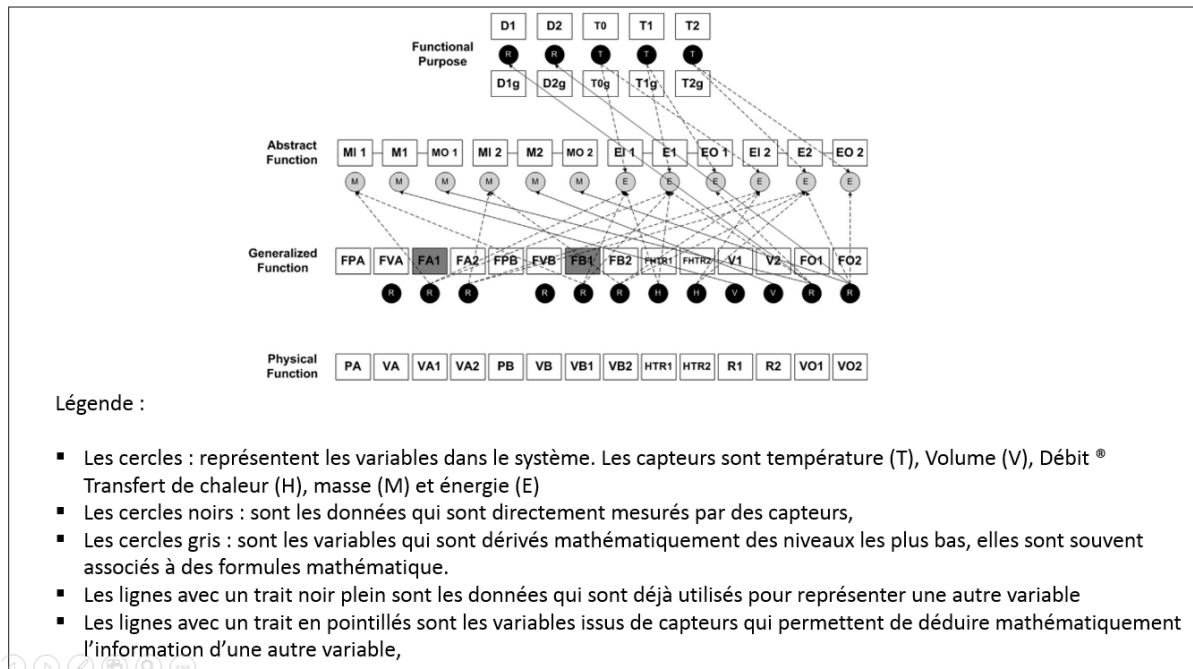


Figure 47 : hiérarchie d'abstraction avec information sur l'instrumentation (traduit de l'anglais St-Cyr et al., 2013)

Néanmoins, la possibilité de déployer d'une manière standardisée cette démarche de conception dans le champ industriel reste une problématique actuelle. Cette question passe obligatoirement par une implémentation logicielle d'outil d'aide à la conception d'interface écologique.

De nombreuses propositions ont pu émerger de l'état de la recherche dressé dans les pages précédentes parmi lesquels le besoin d'outiller la conception d'une ADS, le besoin de réutiliser des objets graphiques qui ont été proposés dans la littérature, le besoin de proposer une structure stable qui respectera le suivi de la matrice modélisant le domaine de travail...

Dans ce contexte, le système de conception Anaxagore constitue un tremplin pour instrumenter le processus de conception écologique. En effet le flot de conception Anaxagore, de par sa démarche, utilise un schéma d'entrée pour le moment de bas niveau, mais qui dans le futur pourrait intégrer les informations de haut niveau propres aux interfaces écologiques. Anaxagore utilise également une bibliothèque d'éléments graphiques, qui pourrait à terme devenir une bibliothèque d'objets écologiques. Enfin, la mécanique pour associer informations de haut niveau et objets graphiques a commencé à être élucidée ((Burns & Hajdukiewicz, 2013) & (Liu et al., 2002a)). Ainsi, au vu de tout cela, les opportunités de recherche autour de l'outil Anaxagore semblent riches et prometteuses et laissent le champ libre à un réel potentiel d'innovation dans le domaine de la conception écologique d'interface.

4. Problématique

Après des décennies de maturation, la conception d'interfaces écologiques a montré sa capacité à répondre à de vraies questions critiques dans le domaine du contrôle de processus industriel. À travers de nombreuses expérimentations, elle a apporté la preuve de ses qualités pour aider les opérateurs à faire face à une grande variété de problèmes et d'évènements indésirables, susceptibles parfois de mener à des catastrophes humaines, écologiques et financières importantes. Les chercheurs ont également répondu à beaucoup de questions et critiques méthodologiques pour une démarche souvent non formalisée, qui laisse place à beaucoup d'interprétations et de créativité dans les choix des solutions proposées ce qui en sortie ne garantit pas la qualité de conception d'une interface écologique à l'autre.

Les travaux sur la démarche de réalisation d'une analyse du domaine de travail (Naikar et al., 2005) et les recherches proposant une démarche de conception concrète pour la conception d'interface écologique (Kim et al., 2012) vont clairement en faveur d'une meilleure formalisation de la démarche. De même que les travaux de Liu et al., (2002) sur la formalisation du passage d'une analyse de domaine de travail à une interface vont dans le bon sens.

Cependant, bien que des progrès certains ont eu lieu, un pas reste encore à franchir pour que tout cela mis en ensemble puisse aboutir à une meilleure intégration dans le contexte industriel de la démarche de conception écologique (Terrier et al., 2001). En effet, à l'heure actuelle, les entreprises rechignent à franchir le pas vers la conception d'interfaces écologiques, à cause d'une conception encore longue et coûteuse en temps et efforts (Vicente, 2002). À cause également de l'absence d'outils informatiques favorisant la réutilisation de représentation, patterns et tout simplement des connaissances développées sur les interfaces écologiques.

Read et al., (2015) soulignent qu'il existe un taux important de projets basés sur l'ingénierie cognitive qui au final ne sont pas implémentés en solutions concrètes. Dans leur enquête (Read et al., 2015) seulement 23% des projets initiés sur la base d'une analyse cognitive du travail se concluent par une implémentation. Toujours dans la même étude, on apprend également que près d'un concepteur d'interfaces écologiques sur deux considère qu'il est nécessaire de compléter l'approche écologique par d'autres approches de conception plus conventionnelles.

Nous pensons qu'en réutilisant les travaux sur la conception écologique de ces dernières années, il est possible de proposer une démarche de conception écologique plus rapide, plus formelle et qui garantisse une véritable qualité et robustesse des interfaces écologiques. Tout ceci en conduisant à une transformation plus importante des projets initiés sur la base d'une analyse écologique du travail, en des interfaces réelles et utilisées effectivement dans les systèmes industriels.

Si nous reprenons le flot de conception écologique (Kim et al., 2012), on distingue quatre problématiques principales de recherches permettant de réduire les coûts en temps et en effort associés à un processus de conception écologique (Figure 48).

- La première problématique est de savoir comment effectuer une vérification et une validation formelle de domaine de travail, ce qui correspond à répondre à la question est ce que la structure de la hiérarchie répond aux attentes initiales ? Au-delà de simplement répondre à cette question de manière formelle, l'optique d'y répondre en y appliquant le moindre coût et effort en temps et en moyens est primordiale. À notre connaissance la littérature n'offre pas de modèle formel de validation et vérification de domaine de travail. Les techniques existantes sont empiriques et impliquent l'utilisation d'opérateurs dans la phase de vérification ce qui est très souvent long et coûteux en temps et effort.
- La seconde problématique concerne l'optimisation des processus de conception touchant à l'analyse du domaine de travail et la représentation de ce domaine de travail en objets visuels, car nous pensons que pour une conception optimisée, ces deux aspects de l'analyse du domaine de travail sont indissociables. Il nous semble donc important de proposer un outil permettant la construction informatisée d'un domaine de travail qui soit intégré dans une vision plus globale comprenant la génération de représentations visuelles. Ce qui à l'heure actuelle n'existe pas. Skilton et al., (1998) ont proposé un outil permettant de réaliser une analyse du domaine de travail, mais qui ne projette pas l'analyste vers les étapes futures et s'arrête à un outil de stockage et d'organisation de l'information.
- La troisième problématique est fortement liée à la précédente. Elle pose la question de savoir comment aider le concepteur dans la phase de visualisation de l'information. La littérature propose plusieurs pistes intéressantes, dont celle de se resservir des objets graphiques déjà développés par le passé. De plus, Liu et al., (2002) proposent une vraie démarche qu'il ne reste qu'à décliner dans le champ industriel.
- La dernière problématique est celle ayant initiée le projet. Elle est plus directement liée au contexte industriel de ces travaux de recherches. Elle cherche à répondre à la question de comment garantir la qualité et l'ergonomie des interfaces générées par le flot de conception Anaxagore. Il s'agira de vérifier si les interfaces issues du flot de conception aboutissent à des interfaces plus performantes.

Pour répondre à toutes ces différentes questions, nous chercherons à innover en proposant des solutions méthodologiques et pratiques. Solutions que nous chercherons à implémenter à travers le logiciel Anaxagore, garantissant en sortie la robustesse des interfaces générées.

Face à ce gage de robustesse qu'offre la conception d'interfaces écologiques, nous tenterons de répondre dans le prochain chapitre à la première problématique sur la vérification et la validation formelles d'un domaine de travail puis dans un troisième chapitre

nous présenterons les solutions utilisant le flot de conception Anaxagore pour résoudre la deuxième et troisième problématique. Enfin nous terminerons par évaluer les apports de la démarche écologique au flot de conception pour la génération d'interfaces performantes et ergonomiques.

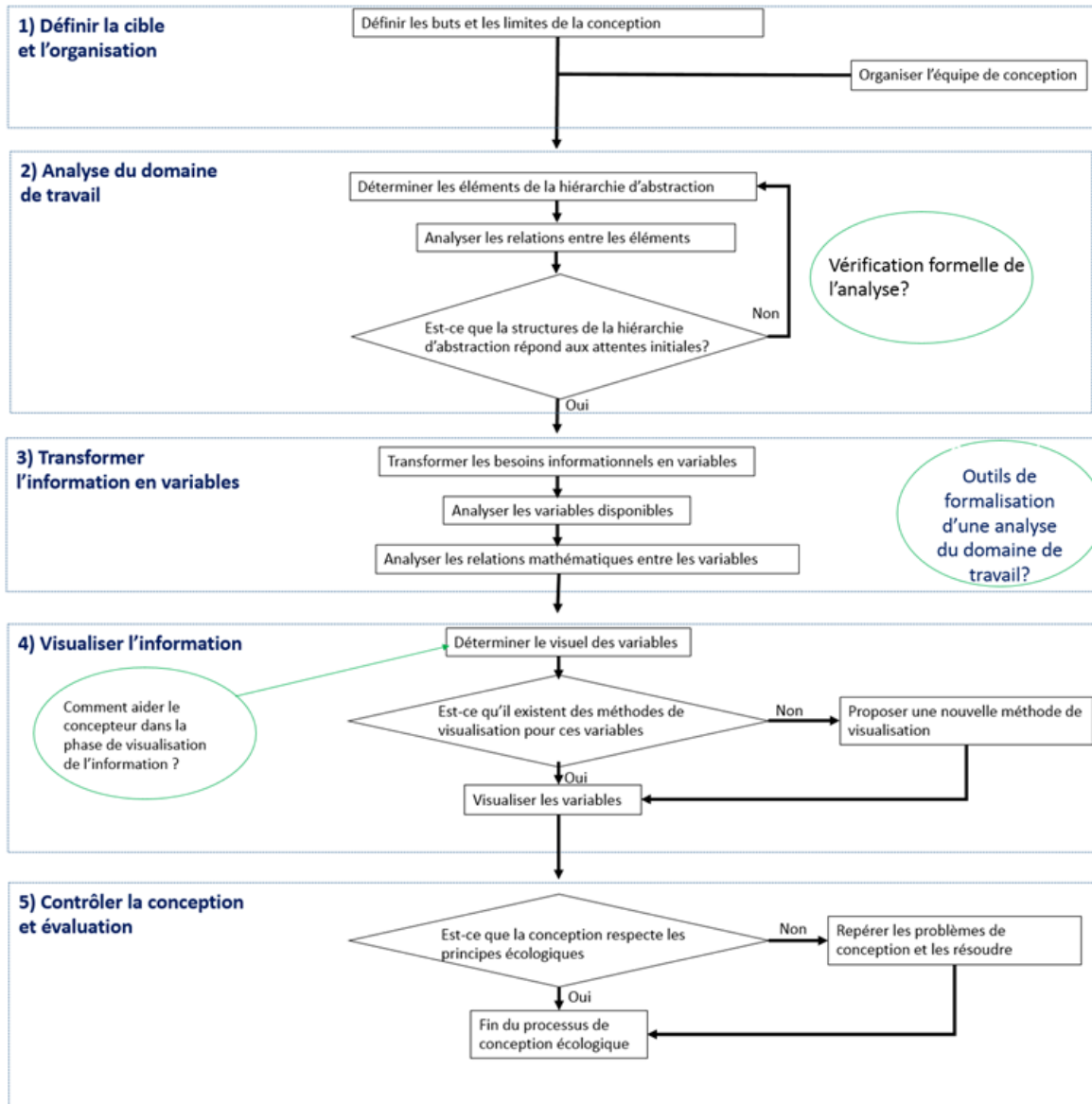


Figure 48 : Processus de conception écologique et problématiques

Chapitre 2 : Un outil de validation et de vérification formelle des analyses du domaine de travail

En enrichissant l'outil Anaxagore, nous nous proposons d'aider le concepteur d'interface écologique tout au long de la démarche de conception. Cela se traduit par des outils informatisés pour l'aide à la conception que nous aborderons dans le chapitre 3, en passant par la validation/vérification des informations mises en entrées pour compléter la matrice de domaine de travail que nous aborderons dans ce premier chapitre. En effet, aujourd'hui, les modèles produits par la WDA doivent pouvoir être vérifiés et validés s'ils veulent être pleinement utilisables à l'échelle industrielle. Notre objectif est de proposer une méthode formelle de vérification et validation d'un modèle issu d'une analyse du domaine de travail. La vérification du modèle porte sur la construction d'un bon modèle. La validation vise à considérer qu'un modèle représente correctement une réalité (Rykiel, 1996). Dans la section suivante, nous considérons les ressources méthodologiques disponibles actuellement pour vérifier et valider un modèle de domaine de travail. Puis nous présentons la méthode « Turing Machine Task Analysis » (TMTA) comme une méthode de vérification et validation d'un modèle issu d'une analyse du domaine de travail (Rechard, Bignon, Berruet, & Morineau, 2015). La section suivante illustre la validation/vérification d'une analyse menée sur un système de distribution d'eau douce dans un navire. Nous concluons enfin sur les contributions et perspectives apportées par la méthode TMTA et la proposition d'outils informatiques destinés au concepteur pour vérifier une matrice de WDA.

1. Contexte

Appliqué à une analyse de domaine de travail, le processus de vérification a pour objectif de révéler si les différentes propriétés du domaine ont été correctement placées dans les bonnes cases de la matrice de domaine de travail, en fonction de leur niveau d'agrégation et d'abstraction. Il abordera également la vérification du bon fonctionnement des relations « moyen/fins » entre ces propriétés. Un principe important à suivre pendant la WDA est que chaque objet dans le domaine doit être représenté par des affordances qui sont présentes à chaque niveau d'abstraction.

La validation d'un modèle de domaine consiste à s'assurer que les affordances d'un domaine de travail sont les bonnes et si la précision avec laquelle elles sont décrites, est correcte. La validation d'un modèle consiste à s'assurer par la démonstration de la correcte utilisation d'un formalisme de modélisation (Rykiel, 1996). Un domaine peut être trop générique ou trop affiné par rapport aux objectifs d'une analyse. Habituellement le niveau de généricité d'un domaine de travail est laissé à la discrétion de ses concepteurs sans validation subséquente. Toutefois, les procédures de validation de modèles formels en ingénierie recommandent de séparer les sources d'informations utilisées pour concevoir les modèles de ceux utilisés dans le cas de processus de validation apparente (Sargent, 2013). Concernant la WDA, Naikar, Hopcroft, & Moylan, (2005) conseillent de faire appel à des experts dans des secteurs variés, après la conception du modèle pour valider chaque niveau d'abstraction contenu dans le modèle. Les ingénieurs peuvent juger les aspects physiques du domaine. Les opérateurs peuvent valider les niveaux intermédiaires de la hiérarchie d'abstraction. Les décideurs peuvent analyser les objectifs fonctionnels et les lois définissant les fonctions abstraites. Cependant, une telle approche est très lourde à implémenter. Une autre forme de validation est la comparaison de différents modèles. Cette technique de validation a été explorée par Burns, Bisantz, & Roth, (2004) à travers une comparaison de domaines de travail distincts, mais semblables. Ces domaines portaient respectivement sur la refonte d'un système de contrôle de processus à bord d'une frégate canadienne et la conception d'une nouvelle classe de navire militaire de l'US Navy. Les auteurs concluent que pour vraiment être en mesure de faire une bonne comparaison, deux équipes d'analystes seraient nécessaires. Mais, une telle technique serait très coûteuse en temps et en effort.

Une alternative pourrait se trouver dans les recherches sur les modèles mentaux en ingénierie cognitive. En s'appuyant sur le fait que l'opérateur humain expert suit mentalement un chemin spécifique entre les niveaux d'abstraction pendant la résolution de problèmes, en suivant le processus de « penser à haute voix », on peut en déduire que les affordances demandées à chaque niveau d'abstraction sont présentes ou non dans le modèle de domaine de travail. En effet sur la base de recherches expérimentales, des principes psychologiques dirigeant la navigation mentale de l'expert ont été proposés dans la littérature (voir pour une récente revue de la question Meineri & Morineau, 2014)).

Particulièrement il a été montré qu'un expert durant la phase de diagnostic des problèmes favorise un cheminement vers le bas de la hiérarchie d'abstraction tandis qu'en situation normale un expert va considérer uniquement les niveaux les plus hauts, les objectifs fonctionnels. Cependant, l'analyse des verbalisations nécessite de réaliser un codage précis des verbalisations.

À l'heure actuelle, la seule méthode explicitement proposée pour la validation d'une WDA est la technique de « scenario mapping » proposé par Burns, Bryant, & Chalmers, (2001). Pour illustrer cette méthode, les auteurs proposent à trois opérateurs humains, qui travaillaient à la commande d'une frégate de vérifier un modèle de domaine de travail de la frégate en référence à un scénario d'engagement avec un objet non identifié sur le radar. Après une introduction de la méthode, chaque expert décrivait étape par étape comment le scénario pouvait se référer au modèle du domaine de travail. À la fin de chaque étape, les discussions et comparaisons des propositions étaient guidées par les analystes. Les experts disaient être capables de manipuler facilement le modèle du domaine à travers cette méthode. Une limite de cette méthode est que le « scenario mapping » est basé sur une prescription assez vague donnée aux experts. Le risque est que les experts tendent à interpréter les affordances décrites dans le modèle du domaine comme faisant vaguement référence aux étapes de la tâche. Des affordances du domaine de travail peuvent concerner un scénario sans pour autant constituer des conditions nécessaires et suffisantes pour déclencher la séquence des événements du scénario. La seconde limite de cette méthode tient dans le besoin persistant d'experts dans la phase de validation, qui doivent être entraînés à la méthode WDA, ce qui est coûteux. Lors d'un travail de validation d'un modèle du domaine de travail appartenant à la pétrochimie, Miller & Vicente, (1998) ont réussi à éviter de faire appel à des experts. La validation a été faite par l'un des auteurs, qui n'était pas expert du domaine. Ils ont utilisé un scénario de situation dégradé existant. Cependant, leur scénario consistait simplement en un texte confronté à l'analyse du domaine. Une démarche plus formalisée serait nécessaire.

Une dernière alternative utilisée pour la validation en ingénierie est la technique de la « validation par boîte noire » qui consiste à faire fonctionner le système sous les mêmes conditions qu'un système dans le monde réel (Robinson, 1997). Dans le contexte de la vérification et la validation d'un modèle de domaine de travail, cela pourrait correspondre à la simulation d'une activité réalisée par un agent dans le contexte d'un scénario de tâche et dans l'interaction avec un domaine de travail donné. Cette technique de validation ne conduira pas à directement vérifier les tâches des scénarios face à un monde réel, mais plutôt à mesurer les fonctionnelles possibilités d'un agent à réaliser le scénario avec l'aide des affordances décrites dans le modèle de domaine de travail. Dans ce contexte les critères de validation ne seraient pas tant les jugements des experts, mais le possible déclenchement d'une action donnée d'un agent des tâches de simulation à accomplir. Nous présenterons

dans la partie suivante un nouveau modèle pour vérifier et valider un modèle de travail à travers la simulation de scénarios de tâches d'un domaine de travail.

2. Turing Machine Task Analysis (TMTA)

La méthode est basée sur le formalisme des machines de Turing (Wells, 2002). Cette méthode appelée « Turing Machine Task Analysis » (TMTA) modélise un agent en interaction avec un domaine de travail, comme étant une machine capable de lire des symboles sur une bande de papier (Figure 49). Compte tenu d'un certain nombre de registres d'actions disponibles pour un agent, la présence ou non de symboles sur la bande de papier permettra ou non une activité de l'agent pour la réalisation de la tâche dans une situation de travail dégradée. Les symboles sur la bande de papier représentent les affordances du domaine de travail. L'application de cette méthode sur des tâches élémentaires comme l'interaction avec une porte (Morineau, Frénod, Blanche, & Tobin, 2009), avec un stylo (Morineau, 2011) ou durant une tâche de préparation de thé (Morineau, 2010) ont montré que la simulation d'une simple séquence de tâche est possible avec un relatif haut niveau de précision. Les opérations sur les affordances du domaine de travail peuvent être décrites étape par étape au cours de la séquence de tâche. Cette précision conduit à considérer cette méthode comme un outil pour la vérification et la validation d'un modèle de travail. Si le domaine de travail est juste, la simulation du scénario de tâche devrait fournir une bonne interaction entre l'agent et le domaine de travail.

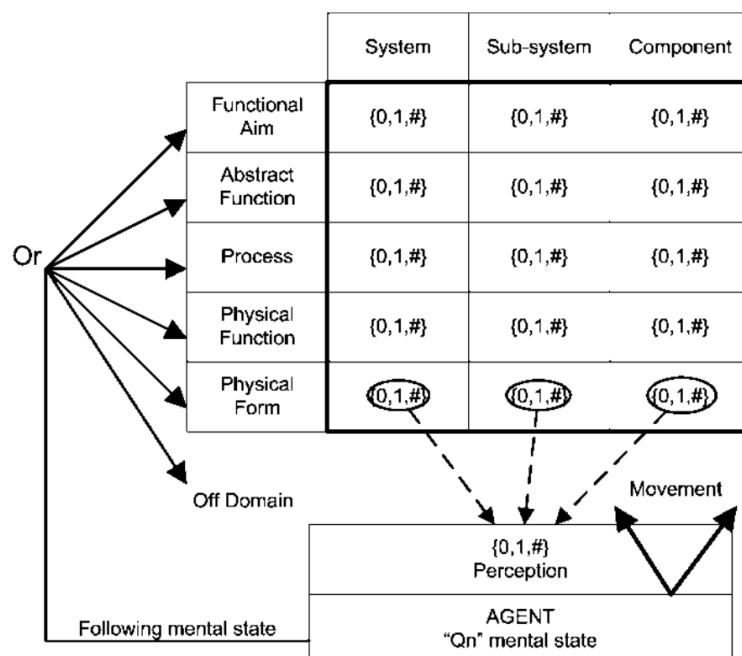


Figure 49 : TMTA

La machine de Turing consiste en un agent qui interagit avec une bande papier de tailles infinies comprenant un ensemble de cases, dans le cadre de la méthode TMTA les cases de notre domaine de travail. Sur chaque boîte de ce ruban de papier ou de la méthode

TMTA, un symbole peut-être soit lu ou écrit par l'agent. Les symboles possibles correspondent en un ensemble fini, par exemple $\{0, 1, \#\}$. Quand l'agent écrit un symbole sur une case, cela supprime instantanément le symbole précédent. L'agent peut aussi déplacer la bande de papier de la gauche vers la droite. L'agent est en permanence dans un état. Il peut aussi changer ou ne pas changer d'état. Ce concept de machine d'état peut simuler tant un contexte cognitif spécifique dans lequel une affordance (un symbole) est perçue (lue), qu'une forme de forme dynamique de mémoire dans laquelle un symbole perçut est associée à un état mental donné. La définition des opérations de l'agent (lire, écrire, bouger, changer d'état) est définie à travers une table d'instructions, un algorithme. La méthode TMTA est une adaptation moins formelle du modèle de la machine de Turing. Cette adaptation permet de considérer la modélisation de toutes sortes de séquences de tâche. Dans le contexte de l'utilisation de TMTA pour la vérification et la validation, le formalisme des machines de Turing sera appliqué ainsi :

- La bande de papier représente le domaine de travail. Selon le niveau d'analyse considéré, chaque carré de la bande papier peut correspondre soit à une cellule de la matrice à travers les deux hiérarchies soit à une affordance spécifique à l'intérieur d'une seule cellule de la matrice.
- Les symboles sur la bande de papier correspondent à l'état des affordances du domaine de travail. Cet état est la valeur de l'affordance en relation au but de la tâche. À un niveau très général d'analyse, c'est possible de considérer que toute affordance peut transmettre un état satisfaisant ("1"), un état non satisfaisant ("0"), ou un état qui n'est pas pertinent (" # ") pour une tâche donnée.
- Les symboles lus sur la bande de papier représentent la perception des affordances du domaine de travail par l'agent, i.e. l'opérateur humain avec l'aide d'outils ou machines. Les mouvements de la bande de papier dans le formalisme de Turing peuvent ou peuvent ne pas être transcrits dans la méthode TMTA. Si l'analyste suppose que l'agent est capable de percevoir l'ensemble du domaine de travail à un niveau d'abstraction donné d'un seul coup d'œil, alors il n'y aura pas de mouvement d'une case à l'autre. La bande de papier est fixe. Si, par contre l'analyste suppose que l'agent a accès à seulement un sous-ensemble du domaine de travail à la fois, alors il est nécessaire de modéliser le déplacement de la bande par l'agent, à partir d'un cas à l'autre. Ces mouvements peuvent correspondre aux mouvements réels de l'agent. Les symboles écrits sur la bande de papier représentent des changements dans l'état des affordances. Ces changements peuvent être produits par les actions de l'agent. Mais, en raison de nouveaux événements dans l'environnement, les symboles peuvent changer sans aucune action de l'agent. Les événements dans le domaine de travail peuvent changer d'une manière ou d'une autre les valeurs des affordances. Nous supposons que l'agent cherche à donner aux affordances un état satisfaisant. Cela signifie écrire le symbole "1". Les actions de

l'agent appartiennent à un registre a priori défini à partir des capacités de l'agent et des instruments.

- Les états de la machine de Turing représentent les états mentaux de l'agent. Cherchant à assurer un contrôle cognitif sur le domaine de travail, chaque état se réfère à un niveau de la hiérarchie d'abstraction à un moment donné. Grâce à ces états mentaux, l'agent perçoit le domaine de travail à travers un point de vue particulier. Les transitions d'un niveau d'abstraction à un autre correspondent à une navigation mentale qui enrichit les modèles mentaux de l'agent.

3. Simulation par TMTA

3.1. Théorie

Comme pour la technique de la boîte noire pour vérifier et valider un domaine de travail, l'utilisation de TMTA pose un scénario d'entrée, une séquence de tâches de sortie et un ensemble de règles de transformation du scénario en une séquence de tâche. Le scénario d'entrée peut être un texte produit par un expert renvoyant à un événement imaginé ou à des événements réels. Évidemment, le scénario ne devra pas avoir été utilisé pour concevoir le modèle de domaine de travail. La séquence de tâches en sortie peut être représentée par un tableau comprenant les colonnes suivantes : étapes dans la séquence de tâche, scénario d'événement décrit à chaque étape, tous les composants de la hiérarchie d'agrégation dans laquelle les affordances et leur valeur peuvent être perçues par l'agent, les états actuels de l'agent renvoyant à un niveau de la hiérarchie d'abstraction, le niveau suivant dans lequel l'agent ira mentalement, et enfin les actions réalisées par l'agent. Chaque ligne du tableau décrit une étape de la séquence de tâche. La Figure 50 illustre le principe de la simulation TMTA.

Les règles pour spécifier une séquence de tâche sont les suivantes. Considérer que chaque affordance d'un domaine de travail peut prendre une des trois valeurs suivantes {0, 1, #} selon son état pour un scénario de tâche donné ; cela rend possible de déterminer l'état ou le sous-état d'un ensemble ou sous-ensemble d'affordance dans le domaine de travail à un moment donné.

L'assignation de valeur aux affordances est faite de manière incrémentale. Premièrement, pour un niveau d'abstraction donné, les affordances pertinentes qui peuvent prendre les valeurs "0/1" dans chaque cellule d'agrégation seront sélectionnées en fonction des événements qui se produisent dans la situation. Par défaut, toutes les affordances non sélectionnées prendront la valeur "#". Pour plus de commodité, les affordances non pertinentes ne seront pas représentées dans le tableau de séquence de tâches. Au début d'un scénario, le niveau d'abstraction de départ sera celui des objectifs fonctionnels. Si au moins une des affordances sélectionnées est dans un état insatisfaisant ("0"), alors l'agent devra aller vers le niveau d'abstraction situé juste en dessous, i.e. le niveau des fonctions

abstraites après les objectifs fonctionnels. Les actions faites par l'agent pour réguler cette situation seront aussi décrites. Nous considérerons que normalement seulement une seule action est associée à une étape du scénario.

À un niveau d'abstraction donné, si toutes les affordances pertinentes au niveau des formes physiques satisfont le but de la tâche alors l'agent revient au niveau des objectifs fonctionnels. Si la simulation du scénario est bloquée à une étape, alors cela peut vouloir signifier que le modèle du domaine de travail doit être repris en termes de validation ou de vérification. Nous allons à présent illustrer l'application de cette méthode sur un système d'eau douce à bord d'un navire.

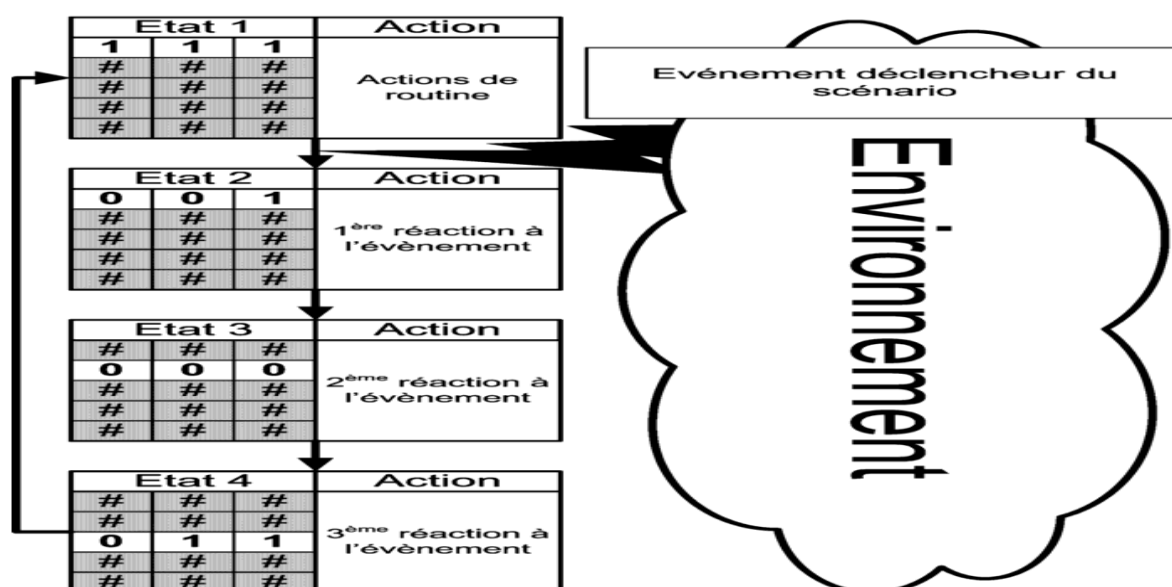


Figure 50 : Simulation par la méthode TMTA

3.2. Cadre d'application

Nous présenterons tout d'abord un domaine de travail intentionnel inspiré de précédentes analyses ((Birrell, Young, Jenkins, & Stanton, 2012), (Nam & Myung, 2007), (Stoner, Wiese, & Lee, 2003)). Puis nous aborderons un domaine de travail causal sur un système d'eau douce sanitaire embarqué à bord d'un navire qui servira par la suite de cadre expérimental à la recherche portant sur le flot de conception Anaxagore. Ce choix de cadre d'application prend son origine du fait de la prédominance originelle des activités marine du groupe Segula Technologies sur le site de Lorient (56).

3.2.1. Un domaine intentionnel : La conduite automobile

L'application de la TMTA sera illustrée à travers la simulation d'un scénario d'incident de voitures. Nous présenterons tout d'abord le domaine de travail de la conduite automobile.

a. Analyse du domaine de travail pour la conduite automobile (Tableau 11)

Pour l'objectif fonctionnel du système global de conduite, de multiples conflictuels objectifs comme la sécurité, l'efficacité, le plaisir de conduire, peuvent être considérés. L'objectif fonctionnel du sous-système « zone de voyage » est pour le véhicule de bouger les roues qui transportent les passagers et les équipements associés. En accord avec Burns et al nous n'avons pas proposé d'ensembles définis d'objectifs fonctionnels pour le sous-système « nature ». Nous avons donc décidé d'indiquer la présence ou l'absence de ce sous-système. Les fonctions abstraites pour le système global comprennent freiner à temps afin d'éviter la collision, l'équilibre entre risque pris et gains associés avec cela et l'équilibre entre coûts en énergie et performance en terme de vitesse. La zone de voyage est gouvernée par les règles du code de la route et les règles de sécurité liées aux voyages. Les fonctions abstraites du sous-système « nature » correspondent aux notions de masse et d'énergie impliquées dans la nature, la météorologie et aussi les lois gouvernant la vie dans un écosystème incluant les plantes, les animaux et les humains. Enfin le sous-système « véhicule » est régi par les principes de la conservation et de la transformation de l'énergie, l'équilibre des forces et des masses en mouvement.

« Le chemin » ou la route choisie peut être considéré comme l'affordance clé pour le système dans son ensemble au niveau des fonctions généralisées. Concernant le sous-système « zone de voyage », les processus sont les routes, les contraintes de trajectoires et de vitesses, les intentions des autres conducteurs, le Code de la route ou les usages entre les conducteurs par exemple l'utilisation d'appel de phare pour avertir un autre conducteur d'un danger imminent. Le sous-système « environnement naturel » est fait d'un ensemble de processus de changement météorologique tels que la lumière du soleil, le vent, la présence de nuage, la pluie, la neige, la grêle... Pour le sous-système véhicule, la dynamique du véhicule, la propulsion et l'énergie consommée sont les principaux composants du niveau des fonctions généralisées. En termes de fonctions physiques, le système dans sa globalité peut être vu comme un ensemble d'événements spatiaux temporels tels que le point de départ du conducteur, son point d'arrivée ou encore les étapes entre les deux. « La zone de voyage » contient au niveau fonction physique les spécificités des types de routes rencontrées, ainsi que la dynamique et les caractéristiques des obstacles et équipements rencontrés sur le chemin. Le sous-système nature se compose d'un ensemble de variables fonctionnelles telles que la luminosité, la vitesse et la direction du vent, la nébulosité, la pente de la route, ou les mouvements d'un animal. Le sous-système « véhicule » se compose des affordances sur la position relative du véhicule, sa vitesse, sa direction, l'état fonctionnel du véhicule et les capacités du moteur. Ces variables prennent finalement la forme au niveau des formes physiques, pour le système dans sa globalité de l'état de la situation du trafic avec les voitures, les camions, deux roues ou encore les piétons. Pour le sous-système « environnement naturel », les affordances prennent la forme d'un paysage avec des conditions climatiques, la présence ou l'absence d'animaux. Enfin les affordances, au niveau

forme physique pour le véhicule s'apparente à un volume particulier avec une forme et des dimensions précises.

b. Un scénario simulé : l'évitement d'un animal

Le scénario simulé dans la suite sera celui d'une tentative d'évitement d'une collision sur la route (Van Elslande, Jaffard, Fouquet, & Vatonne, 2008). Un conducteur conduit sur une route de campagne et soudain perçoit un chien courant et traversant la route de manière perpendiculaire au véhicule. Dans un premier temps le conducteur freine. Cependant cette première action n'est pas suffisante alors le conducteur tente une manœuvre d'évitement par la voie de gauche. La manœuvre est un succès et la collision est évitée.

Tableau 11 : WDA de la conduite automobile

<i>Objectif fonctionnel</i>	<i>Système global</i>	<i>Zone de voyage</i>	<i>Environnement naturel</i>	<i>Véhicule</i>
	<i>Sécurité, vitesse, efficacité, plaisir</i>	<i>Déplacement</i>	<i>Présence (rajouté)</i>	<i>Transport</i>
<i>Fonctions abstraites</i>	<i>Freiner à temps avant la collision</i> <i>Equilibre risque/ gain</i> <i>Equilibre</i> <i>cout/performance</i>	<i>Règles de trafic</i> <i>Sécurité de la zone de voyage</i>	<i>Masse/ énergie</i> <i>Météorologie</i> <i>Vie dans l'écosystème</i>	<i>Energie conservation et transformation</i> <i>Equilibre des forces</i> <i>Masse en mouvement</i>
<i>Processus</i>	<i>Chemin</i>	<i>Route</i> <i>Contrainte de trajectoire et de vitesse</i> <i>Intention du conducteur</i>	<i>Lumière du soleil, vent, nuage</i> <i>Cycle de l'eau, variations du sol</i> <i>Ecosystème naturel (remplacé par mouvement naturels des animaux)</i>	<i>Véhicule propulsion, Dynamique</i> <i>Energie consommée</i>
<i>Fonction physique</i>	<i>Références à l'espace-temps</i> <i>Points de départ/arrivée étapes</i>	<i>Codes de la route, type de route</i> <i>Equipement sur la route, et obstacles</i>	<i>Visibilité, intensité de la lumière, Direction et force du vent, précipitation, pourcentage de la pente</i> <i>Mouvement de l'animal (remplacé par positions de l'animal)</i>	<i>Position relative, vitesse, direction</i> <i>Capacité du moteur</i>
<i>Forme physique</i>	<i>Apparence de la situation du trafic</i>	<i>Apparences de la voiture, condition de route</i>	<i>Apparence de l'animal, condition du sol</i>	<i>Dimension en particulier</i>

c. Séquence TMTA

Le Tableau 12 illustre la simulation du scénario. En gras et en italique, l'on retrouve les affordances qui dévient de l'état initial défini dans l'analyse du domaine de travail original.

Tableau 12 : Séquence TMTA : scénario un chien qui traverse la route

<i>Etapas</i>	<i>Evénements</i>	<i>Système global</i>	<i>Zone de voyage</i>	<i>Environnement naturel</i>	<i>Véhicule</i>	<i>Etat actuel</i>	<i>Etat suivant</i>	<i>action</i>
<i>S1</i>	<i>Conduite normale</i>	<i>Sécurité : 1</i>	<i>Déplacement : 1</i>	<i>Présence : 1</i>	<i>Transport : 1</i>	<i>Objectif fonctionnel</i>	<i>Objectif fonctionnel</i>	<i>Accélération (normale)</i>
<i>S2</i>	<i>Un animal traverse la route</i>	<i>Sécurité : 0</i>	<i>Déplacement : 0</i>	<i>Présence : 0</i>	<i>Transport : 1</i>	<i>Objectif fonctionnel</i>	<i>Fonction abstraite</i>	<i>Freinage (soudain)</i>
<i>S3</i>	<i>Freinage insuffisant</i>	<i>Temps de freinage : 0</i>	<i>Zone de sécurité de conduite : 0</i>	<i>Masse et entropie : 0</i>	<i>Equilibre des forces : 0</i>	<i>Fonction abstraite</i>	<i>Processus</i>	<i>Tourner à gauche</i>
<i>S4</i>	<i>Dépassement</i>	<i>Chemin : 0</i>	<i>Route : 0</i>	<i>Ecosystème/ mouvement de l'animal : 0</i>	<i>Dynamique du véhicule : 1</i>	<i>Processus</i>	<i>Fonction physique</i>	<i>Accélération (forte)</i>
<i>S5</i>	<i>Ne reste pas sur la voie de gauche</i>	<i>Référence spatiale : 0</i>	<i>Situation sur la route : 0</i>	<i>Position de l'animal : 1</i>	<i>Etat du véhicule : 1</i>	<i>Fonction physique</i>	<i>Forme physique</i>	<i>Tourner à droite</i>
<i>S6</i>	<i>Retour à la situation normale</i>	<i>Situation du trafic : 1</i>	<i>Localisation : 1</i>	<i>Chien : 0</i>	<i>Véhicule : 1</i>	<i>Forme physique</i>	<i>Objectif fonctionnel</i>	<i>Accélération (graduelle)</i>

Dans l'étape 1, la conduite était dans un état normal et le conducteur considère que les objectifs fonctionnels sont tous remplis (1, 1, 1, 1). Nous complétons par le terme « présence » pour compléter ce que les objectifs fonctionnels pourraient être pour l'environnement naturel. Dans l'étape 2, un animal est en train de traverser la route de la voiture. Cet événement implique un état insatisfaisant, mais le transport en lui-même n'est pas encore concerné par cet événement à cette étape (0, 0, 0, 1). La réaction du conducteur a été de freiner soudainement et de descendre mentalement dans la hiérarchie d'abstraction pour garder le contrôle de la situation. Dans l'étape 3, le feedback sur les actions des conducteurs montre une situation insatisfaisante au niveau des fonctions abstraites les temps de freinage, les espaces de sécurité du voyage, la masse et l'entropie dans l'environnement naturel et l'équilibre des forces pour le véhicule (0, 0, 0, 0). Le conducteur tente une autre action pour dépasser par la gauche. Dans l'étape 4, la voiture était dans la voie de gauche et le conducteur perçoit le domaine de travail comme un ensemble de processus par exemple la circulation sur la ligne de gauche, et le mouvement

dangereux de l'animal sur sa ligne. Mais la dynamique du véhicule devient satisfaisante grâce à l'action précédente (0, 0, 0, 1). L'action suivante consistait à accélérer. Dans l'étape 5, le domaine était perçu comme un ensemble de fonctions physiques les indices provenant de l'espace sont insatisfaisants au regard du système dans sa globalité et la zone de déplacement. Le véhicule ne peut pas rester sur la voie de gauche. L'animal finissait de traverser la route et l'état fonctionnel de la voiture reprenait son état satisfaisant (0, 1, 1, 1). Cette configuration conduisait le conducteur à revenir la voie de droite. Enfin dans l'étape 6, la situation critique était terminée. La localisation et les apparences du système global et des sous-systèmes étaient dans un état satisfaisant (1, 1, 1, 1).

d. Discussion

La simulation du domaine critique a mis en lumière des questions sur le contenu du domaine de travail. En terme de vérification, il est apparu que les objectifs fonctionnels du sous-système « environnement » ne pouvaient pas rester vides. Sans au moins une affordance, la machine de Turing ne peut pas traiter une séquence de tâche. Comme défendu par Burns & Hajdukiewicz, (2013), la nature n'a pas d'objectifs fonctionnels en tant que tels, mais sa présence doit au moins être considérée quand un agent interagit avec. Concernant les aspects de validation, nous remarquons le processus d'écosystème naturel n'est pas significativement suffisant dans la séquence de tâche. Elle devrait être remplacée par une affordance telle que le mouvement de l'animal qui était précédemment identifié comme une fonction physique. A la place, il est possible de mettre à ce niveau, l'affordance position de l'animal. Enfin, excepté les remarques citées, le domaine de travail utilisé dans l'illustration semble suffisamment précis pour remplir ce scénario.

3.2.2. *Un domaine causal : Système d'eau douce sanitaire à bord d'un navire (EDS)*

Le second exemple d'application de la méthode TMTA concerne un domaine causal. Ce cas d'étude est issu du projet de recherche Anaxagore mené par SEGULA Technologies. Il s'agit d'un système de production, stockage et distribution d'eau douce embarqué sur un navire hauturier (Bignon, 2012). La Figure 51 en offre une représentation simplifiée.

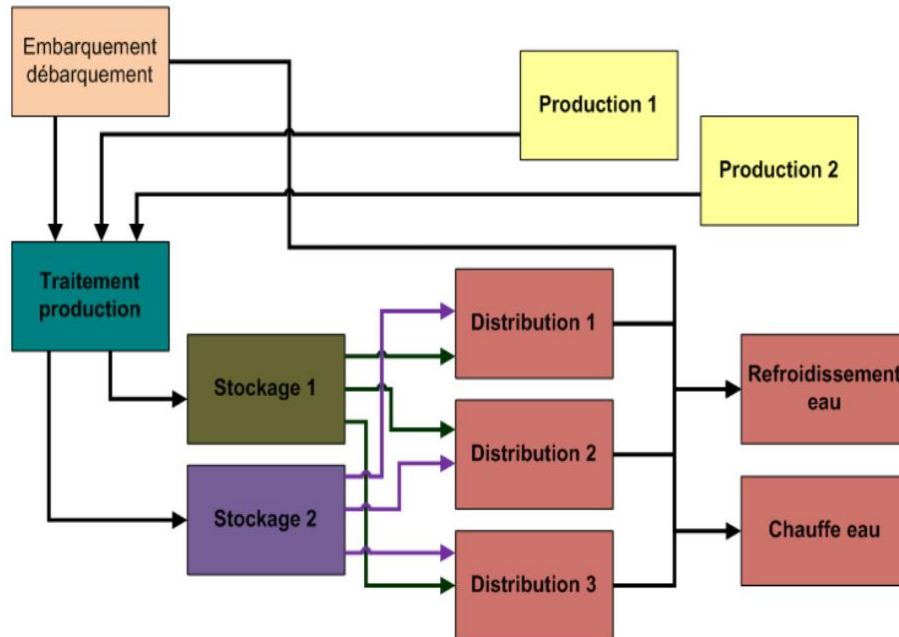


Figure 51 : Système d'eau douce sanitaire

Ce système fonctionne de la manière suivante. D'abord l'eau peut être récupérée soit à partir de la mer à travers un processus de dessalement par osmose inverse (Figure 52) ou par chargement à partir d'un quai. Par la suite, l'eau est amenée par des tuyaux dont le débit est contrôlé par des pompes et des vannes, à deux réservoirs qui servent à stocker de l'eau. Cette eau circule ensuite au moyen de trois groupes hydrophobes. Parallèlement à ce processus, l'eau passe à travers un ensemble d'équipements (chloration et système UV) assurant la potabilité de l'eau. Enfin, certains composants du système fournissent un contrôle de la température de l'eau à la sortie par l'intermédiaire d'un système de chaudière et un système de refroidissement de l'eau. La description du domaine de travail que nous avons choisi de présenter est une analyse synthétique. Le domaine de travail étudié ici est très proche du domaine de travail DURESS qui a fait l'objet de nombreuses études dans le cadre de la conception d'interface écologique. Comme DURESS, ce système sera décrit comme étant constitué d'un système global avec un sous-système constitué de soutes dans un navire et de composants situés autour des sous-systèmes, à savoir, des tuyaux, pompes, vannes et autres dispositifs auxiliaires comme l'osmose inverse.

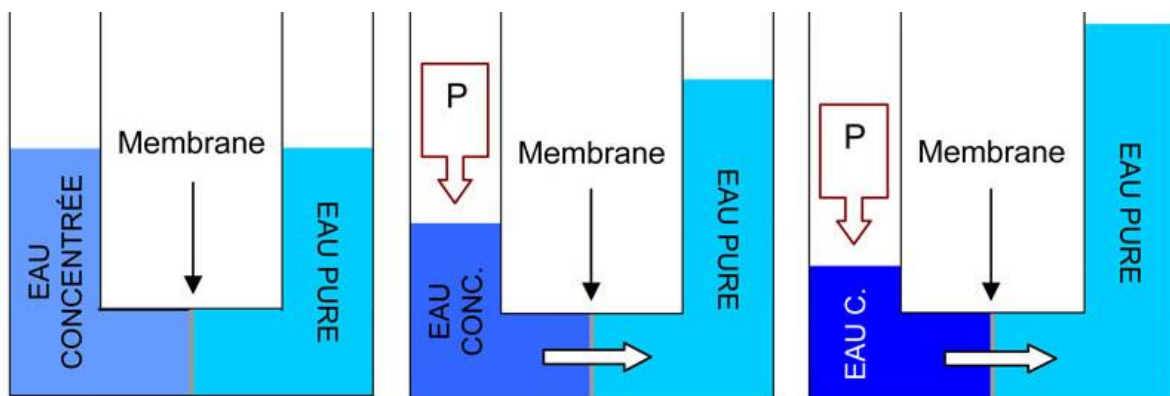


Figure 52 : Principe de l'osmose inverse

a) Analyse du domaine de travail (*Tableau 14*)

L'analyse du domaine de travail a été menée sur une période 16 semaines. Elle s'est basée sur des entretiens auprès d'une population de 8 experts de l'école nationale maritime de Nantes. Le Tableau 13 illustre les caractéristiques de sujets. Les questions étaient de types semi-ouverts. Elles se sont basées sur le guideline proposé par Naikar et al., (2005). L'analyse des entretiens a permis de compléter le domaine de travail du système d'eau douce sanitaire à bord d'un navire.

Tableau 13 : Caractéristiques des experts

	Participant 1	Participant	Participant 3	Participant 4
Statut	Étudiant en 5e année	Étudiant en 5e année	Enseignant	Enseignant
Type de navire	Ferry	Navires sismiques	Ferry	Marine marchande
Connaissance de l'interface machine	Partielle	Complète	Complète	Complète

Les objectifs fonctionnels de l'ensemble du système sont de répondre au besoin en eau potable, et en température de l'eau. Le sous-objectif du brassage a pour but de permettre le brassage d'une soute. Les objectifs des réservoirs sont de stocker l'eau. Les objectifs de la distribution sont de transporter l'eau. Les vannes ont pour rôle de réguler le débit d'eau. Au niveau des objectifs un ensemble de principes de base peuvent être trouvés à tous les niveaux du système : les lois de conservation de masse et les lois relatives à l'énergie (entropie), les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) qui guident l'évaluation de la qualité et la portabilité de l'eau, enfin les principes d'optimisation du contrôle du système qui régule les opérations automatiques versus manuelles sur le système. Les fonctions abstraites correspondent aux volumes, aux débits et flux d'énergie et aux relations qui unissent c'est différentes variables. Les processus qui régissent le système sont aussi partagés par chacun des niveaux du système. Ils concernent les processus identifiés par Liu, Nakata, & Furuta, (2002) et le comportement du système de contrôle.

Au niveau des fonctions physiques, le système dans son ensemble peut être représenté comme un volume d'eau entrant et sortant du système. Les réservoirs sont représentés par des volumes d'eau stockés. Le niveau des fonctions physiques pour les vannes correspond aux fonctions d'ouverture et de fermeture de la vanne, ainsi que la position allumée ou éteinte pour le groupe hydrophore H1. Les formes physiques du système sont associées à l'emplacement et l'apparence des différents composants accessible à l'agent.

Tableau 14 : Domaine de travail Eau douce sanitaire à bord d'un navire

	Système global (EDS)	Sous-système			Composants		
		Stockage par st1	Distribution par H1	...	V1V2V3	H1	...
Objectifs fonctionnels	Objectifs : Fournir de l'eau Température requise Eau potable Efficience de la production Conservation du volume Entropie Norme OMS Optimisation du contrôle	Disponibilité de l'eau	Transporter l'eau	...	Régulation des débits	Fournir de la pression au fluide	...
	Sous-Objectifs : Brasser l'eau dans le réservoir 1 Brasser l'eau dans le réservoir 2						
Fonctions abstraites	Débit d'eau en sortie	Volume d'eau	Débit eau	...	Débit	Pression	...
	Température eau chaude	Débit en entrée					
	Température eau froide	Débit en	Pression à la sortie de H1				
	Valeur des processus biologiques	Débit en sortie					
Processus	Maintenir	Stocker	Transformer et maintenir	...	Comportement automatique ou manuel	Auto	...
						Ou manuel	
Fonctions physiques	Système EDS	Soutes 1	Groupe hydrophobe H1	...	Ouverte ou fermée	Marche ou arrêt	...

b) Simulation d'une soute contaminée

À bord d'un navire, le médecin effectue un test de routine sur la portabilité de l'eau à l'intérieur du système. Dans chaque réservoir, il teste la qualité de l'eau et détecte que l'un des réservoirs est contaminé. Après avoir lancé une alerte à l'équipage, l'agent passe la commande du système en mode manuel afin d'être en mesure de fermer la vanne de maintien et d'arrêter la propagation de la contamination au reste du système. Un brassage de l'eau à l'intérieur du réservoir permet d'améliorer sa qualité. Après cela, la vanne est ouverte et le système de contrôle repasse en mode automatique. Le Tableau 15 rend compte du déroulement du scénario de contamination/décontamination de la soute. Nous avons mis en évidence les affordances qui déviaient du domaine de travail original en les indiquant en gras et italique dans le tableau. Dans la première étape S1, le domaine de travail perçu au niveau des objectifs fonctionnels affiche un état normal (1, 1, 1). La supervision, la disponibilité de l'eau potable dans les réservoirs et les méthodes de régulation des débits par vannes sont normales. Dans ces circonstances (S2), un test de portabilité est réalisé dans un réservoir, S2 (1, 1, 1). Cette action ne nécessite pas de changer de niveau d'abstraction, car il s'agit d'une action routinière. En S3, le test montre qu'un réservoir est contaminé et l'eau qui en résulte n'est pas consommable pour le reste du système. À cette étape, l'état des vannes ne prend pas encore part au problème à résoudre (0, 0, 1). L'action prioritaire est de déclencher une procédure d'alerte auprès de l'équipage. Dans un second temps S4, la considération du domaine au niveau des fonctions abstraites

conduira à considérer l'ensemble des flux dans le système en relation avec le réservoir contaminé, ce qui amène à envisager l'état insatisfaisant de la vanne qui est ouverte et laisse l'eau contaminée se diffuser dans le système (0, 0, 0). Deux actions sont nécessaires : passage en mode manuel et fermeture du réservoir en fermant la vanne. En s5, cette action permet d'arrêter le flux d'eau contaminée et de protéger l'ensemble du système. Le réservoir fermé reste dans un état insatisfaisant, car il est contaminé (1, 0, 1). Le brassage de l'eau dans le réservoir améliorera la qualité. Cette action de brassage sera illustrée sur une autre matrice de domaine de travail du système EDS pour une question de clarification.

Tout d'abord le sous-objectif « brassage » du système global apparaît comme insatisfaisant. L'opérateur va donc essayer d'agir dès ce niveau en proposant une action qu'est le bouton brassage. L'action brassage est une action de haut niveau qui permet à un opérateur de mener le brassage d'une soute. L'opérateur peut agir dès ce niveau pour remettre à 1, l'affordance qui était alors à 0.

À S6, l'ensemble du système retrouve un niveau insatisfaisant puisque les entrées et sorties de volume ne sont pas optimisées par la fermeture de la vanne (0, 1, 0). La reconnexion du réservoir en ouvrant les vannes amène à passer à un état optimal observable au niveau des formes physiques (1, 1, 1). L'agent retourne alors à une activité cognitive guidée par les objectifs fonctionnels.

Vérifions une nouvelle fois la solidité du modèle proposé en nous attardons un instant sur une variante possible à S6. Prenons en considération cette fois-ci le cas où l'opérateur, par erreur, pense que les vannes sont déjà ouvertes et n'ouvrirait donc pas les vannes pour la reconnexion du système (0, 1, 0). L'opérateur pense donc que le système est opérationnel soit (1, 1, 1) et repasse alors dans une phase de contrôle guidée par les objectifs fonctionnels. Il s'apercevra à ce moment-là que les objectifs fonctionnels ne sont pas remplis (0, 1, 0) et ne sont pas dans un état nominal; il déroulera donc de nouveau une séquence de navigation dans le modèle jusqu'à se rendre compte que les formes physiques posent problème, et par finir par ouvrir les vannes.

Tableau 15 : déroulement séquence de contamination

Étapes	Événements	Système global	Sous systèmes Réservoirs	Composants valves	Etat suivant	Actions
S1	Fonctionnement nominal	Eau potable	Disponibilité de l'eau potable	Régulation des volumes et débits	Buts Fonctionnels	Supervision
S2	Séquence normale de supervision	Eau potable	Disponibilité de l'eau potable	Régulation des volumes et débits	Buts Fonctionnels	Prélèvement
S3	Diffusion de l'information à l'équipage pour réaction	Eau potable	Disponibilité de l'eau potable	Régulation des volumes et débits	Fonctions abstraites	Procédure d'alerte
S4	Nécessité de changer de mode de contrôle du système (manuel). Blocage des volumes liés à la soute contaminée. La vanne est dans un état insatisfaisant transitoirement	Loi de conservation volume et contrôle du système	Lois de conservation et volume	Lois de conservation et volume	Processus	Passage en mode manuel+consignement de la soute
S5	Brassage pour modification des processus physico-chimique. Le système est dans un état satisfaisant transitoirement.	Processus physico-chimique et flux	Processus physico-chimique	Flux	Fonctions physiques	Brassage de la soute
S6	La soute est décontaminée Focalisation sur la vanne pour réouverture	Quantité en entrée/sortie	Quantité en stock	Niveau d'ouverture	Formes physiques	Reconnexion de la soute+passage en mode automatique
S7	Retour en situation nominale	Apparences auto/manuel	Apparences	Apparences	But fonctionnels	Supervision

Légende

Affordance prend pour valeur 1
Affordance prend pour valeur 0

c) Discussion

Ce scénario de contamination des réservoirs conduit à quatre questions sur la modélisation du domaine de travail. La première concerne l'intégration de l'automatisation dans le domaine de travail. Il s'avère que l'interaction avec l'automate pour passer en mode manuel et revenir en mode automatique représente des actions supplémentaires en complément avec les actions ciblées sur le système d'eau douce. Le passage en mode manuel est une condition préalable à la tâche pour permettre le blocage de la soude contaminée. Le retour consécutif au mode automatique est une post-condition associée à l'action de revenir à l'état normal de fonctionnement. Ces actions sont contraintes par l'interaction avec l'agent automatisé. L'humain et l'automate agissent mutuellement sur les objets du domaine de travail. Aussi, il semble nécessaire de supprimer l'agent automatisé du modèle de domaine de travail.

En second lieu, la nécessité d'une procédure d'alerte à destination de l'équipage montre que l'équipage doit être inclus dans le modèle de domaine de travail.

En S5, le système global trouve un état satisfaisant, car l'équipage est prévenu de la contamination. Mais si l'on ne prend pas en compte l'équipage, le système reste toujours contaminé et donc dans un état insatisfaisant.

La production d'eau douce vise à satisfaire les besoins d'une communauté de personnes, dont les volumes d'eau en sortie du système dépendent.

La troisième question porte sur la notion des normes sur l'eau potable imposées par l'OMS au niveau des fonctions abstraites. Cette notion semble insuffisante pour expliquer les principes du domaine. Les normes sont des seuils de valeurs qui réfèrent aux lois physicochimiques. Ces lois physico-chimiques doivent être ajoutées aux fonctions abstraites pour comprendre les actions consécutives réalisées par l'agent humain pour résoudre le problème de contamination. La dernière question concerne la nécessité de spécifier les formes et les apparences de l'ensemble du système et de ces composants. Ces spécifications peuvent informer sur la nature exacte des feedbacks qui permettent à l'agent d'identifier l'état du système sur le système de contrôle.

L'application de la méthode TMTA pour vérifier et valider le modèle de domaine de travail montre qu'il est possible de faire ressortir des problèmes concernant un modèle fourni par une analyse du domaine de travail. L'application de cette méthode montre les types de problèmes suivants : sous-spécification, spécification excessive, omission et fausse inclusion d'éléments dans le domaine. Dans notre illustration, la sous-spécification s'observe sur les formes physiques décrites comme un ensemble d'apparences, alors que des informations plus précises s'avèrent nécessaires. Il est à noter que bien souvent les analyses du domaine ne spécifient pas les formes physiques. L'excès de spécification a été trouvé au niveau des fonctions abstraites sur la portabilité de l'eau. Nous avons précisé la nécessité d'un respect des normes OMS. Mais, ces normes sont des valeurs se référant à des lois physico-chimiques plus larges, qu'il est nécessaire de maîtriser pour trouver une solution,

comme celle de brasser la soute pour permettre la décontamination. Le problème d'omission dans le modèle du domaine de travail est illustré par la nécessité d'intégrer l'équipage dans le domaine de travail. Enfin, l'inclusion de fausses affordances dans le domaine de travail a été illustrée par l'inclusion de l'agent automate dans le domaine de travail, alors qu'il s'agit d'un agent nécessitant des actions spécifiques constituant des prérequis et post-requis aux actions réalisées sur le domaine de travail.

Conclusion

La méthode TMTA montre sa capacité à relever une série de questions qui peuvent guider la refonte d'un modèle de domaine de travail. Si cette première tentative s'avère encourageante, il sera nécessaire par la suite d'appliquer cette méthode à d'autres domaines et d'autres scénarii afin de tester la robustesse de cette méthode ainsi que la validité écologique du modèle vérifié. Des travaux sont d'ailleurs en cours sur la vérification et validation d'un domaine de travail en lien avec l'automobile. Par ailleurs, nous pouvons remarquer que, pour le scénario utilisé, une navigation à travers les cinq niveaux du domaine de travail d'abstraction était nécessaire et suffisante pour décrire le contrôle de la situation. D'autres applications de la méthode TMTA devraient nous dire si ce phénomène est dû au hasard ou peut être considéré comme un principe pour modéliser la résolution de situations de travail dégradées. Enfin, il semble s'avérer que dès le moment où un scénario d'entrée est disponible, la méthode TMTA exigerait un niveau d'expertise faible pour produire la simulation d'une séquence de tâche. D'autant plus qu'une informatisation de la méthode a été menée. Son exécution est réalisable automatiquement. Néanmoins une connaissance de l'activité à travers une analyse de la tâche réelle semble indispensable pour pouvoir dérouler le scénario, ce qui implique une connaissance en analyse de la tâche réelle ou la présence d'une personne en mesure d'effectuer une telle analyse pour réaliser la méthode TMTA. Cette hypothèse doit être confirmée, car cela représenterait une contribution significative par rapport à d'autres processus de validations existantes.

Nous sommes en mesure de vérifier un domaine de travail cependant le temps nécessaire pour élaborer l'analyse du système d'eau douce a été très longue. Elle aura nécessité 16 semaines et une très bonne maîtrise des concepts de réalisation d'une analyse de domaine de travail. De plus, aucune technique formelle n'existe pour retranscrire les informations récoltées par la matrice en représentation graphique visuelle. Le flot de conception Anaxagore que nous aborderons dans la partie suivante se veut répondre à ces différentes problématiques.

Chapitre 3 : Intégration des critères ergonomiques dans le flot de conception

Après avoir vérifié les informations, ressorties de la première analyse de domaine de travail, il s'agit de concevoir une IHM écologique, mais à l'heure actuelle cette phase de conception est encore un processus long et fastidieux.

Vicente (2002) faisait émerger lors d'un article sur les progrès et les challenges futurs liés aux interfaces écologiques le besoin de rapprocher monde industriel et méthodes de conception écologique d'interface. Vicente assistait alors sur deux points majeurs le temps et les efforts nécessaires pour réaliser une hiérarchie d'abstraction, et sur le caractère encore très artistique dans le choix des représentations visuelles. Entre temps la recherche sur les interfaces écologiques a continué à s'étendre, mais aucun outil informatique, réellement capable de répondre à ces deux grandes considérations n'a été proposé.

Nous nous proposons donc, dans la continuité du chapitre précédent de présenter un flot de conception informatisé, destiné à aider le concepteur d'interface écologique sur les principaux points soulevés par Vicente. Cet outil se base sur le flot de conception baptisé Anaxagore, présenté dans le chapitre 1. Si l'on reprend les grandes étapes de conception d'une interface écologique et que l'on calque cela avec le flot de conception, l'on s'aperçoit que le schéma d'entrée correspond à la matrice de domaine de travail et que les étapes de transformation des données en représentations visuelles correspondent à l'étape d'association des informations issues des schémas d'entrées avec les éléments de la bibliothèque graphique et le modèle d'IHM standard.

Anaxagore semble donc en mesure de sous-tendre l'activité de conception d'une interface écologique et d'en optimiser le processus de conception.

Pour la suite nous présenterons la proposition et le nouveau flot de conception ressorti de nos choix. Puis nous évoquerons successivement les modifications au niveau des modèles existants puis de l'intégration de la conception écologique et des principes de semantic mapping dans le flot. Enfin nous présenterons l'implémentation d'un exemple concret d'interface écologique générée par Anaxagore, avant de conclure.

1. Proposition

La version 2 du flot de conception Anaxagore apporte plusieurs changements notables par rapport à la version 1 avec notamment la création d'un deuxième schéma d'entrée, d'une bibliothèque de représentations graphiques écologiques, la modification du fond d'IHM standard et le rajout d'un outil de vérification des informations rentrées par le concepteur (Figure 53). Cette version semble être en mesure d'apporter une solution industriellement viable au concepteur d'interface écologique, car réductrice en temps et en efforts consommés (environ 3 fois plus rapide). Elle semble également en mesure de garantir la qualité des interfaces générées. En effet, en limitant les temps dans les phases d'analyse, dans les phases de créations et en réduisant l'écart créatif d'un concepteur à l'autre, Anaxagore dans sa version 2 est en mesure de répondre aux principaux points soulevés par Vicente (2002).

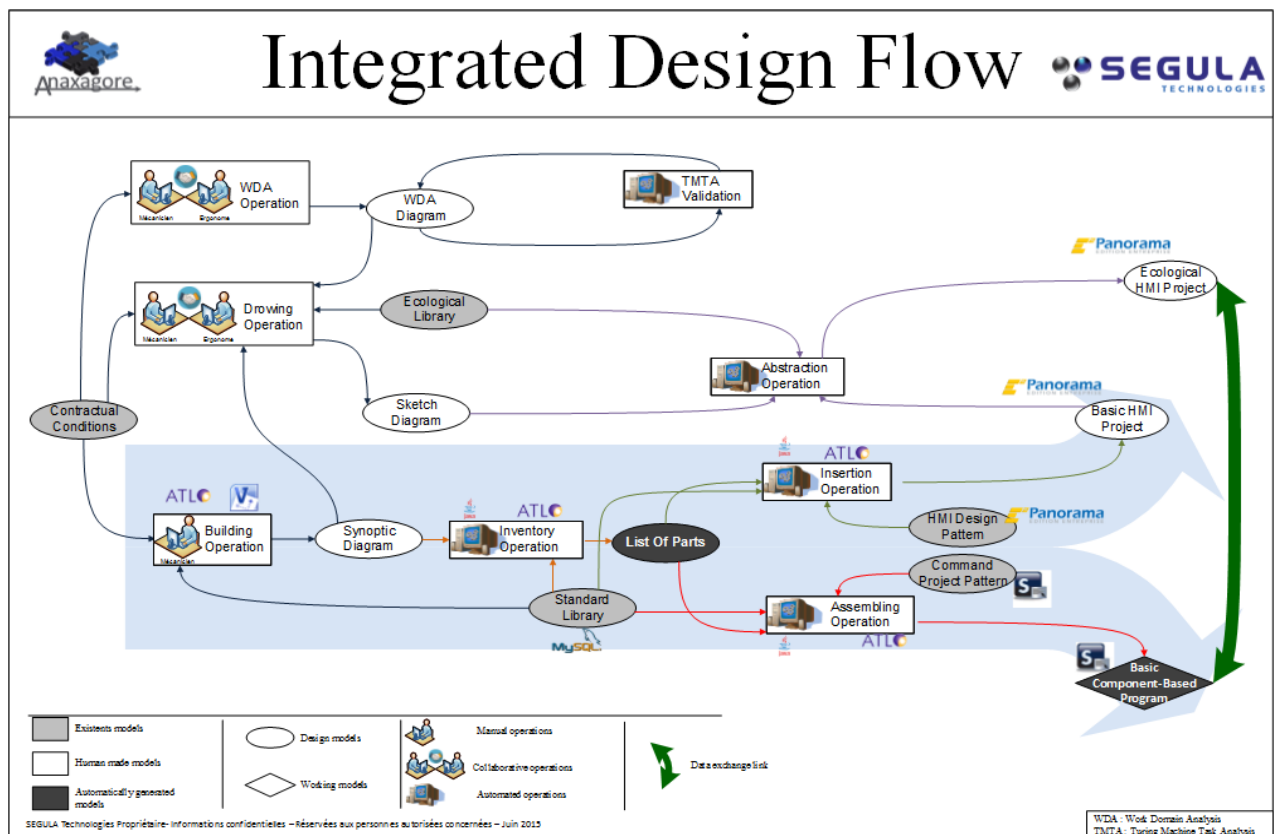


Figure 53 : Flot de conception Anaxagore version 2

Cette seconde proposition du flot de conception Anaxagore s'organise de la manière suivante. Après avoir menée une première analyse du domaine de travail avec l'aide éventuellement du logiciel proposé par Skilton et al., (1998), le concepteur complète les deux schémas d'entrées sous Microsoft Visio. Le premier schéma (Sketch diagram) peut contenir jusqu'à 3 pages, la page de synthèse systèmes et jusqu'à deux pages de représentation de haut niveau. Le second schéma (Synoptic diagram) se composera d'un seul écran. Il est également réalisé sous Visio avec une bibliothèque d'éléments différents du

premier schéma d'entrée. Le processus sélectionné en entrée va déterminer le widget écologique affiché, de même le positionnement des objets processus sur le schéma va déterminer le positionnement à l'écran des éléments. Les objets processus complétés sont associés aux widgets écologiques de la bibliothèque (Ecological library). Les informations complétées sur les schémas en entrée pour chaque objet processus complètent les widgets écologiques puis sont positionnées sur le fond d'IHM standard. Leur disposition sur les schémas en entrée sert de base pour préciser leur emplacement sur le prototype d'interface final qui se décomposera en 3 à 4 écrans pour un système.

Cette nouvelle version du flot de conception complète les travaux mis en lumière dans le chapitre précédent sur la vérification d'une matrice de domaine de travail. Ainsi les informations que le concepteur aura dégagées de l'analyse du domaine de travail (WDA diagram) pourront être vérifiées et validées préalablement par l'outil de vérification TMTA (TMTA validation) garantissant la pertinence des informations entrées dans les deux schémas d'entrées.

2. Modification des modèles existants

Plusieurs modèles de la première version d'Anaxagore ont été modifiés, nous exposerons aux lecteurs dans la partie suivante le travail effectué sur le modèle standard d'IHM, sur les codes couleurs utilisés dans le flot de conception et sur la bibliothèque d'éléments standardisés.

2.1. Le modèle standard d'IHM

2.1.1. Définition

Le modèle standard d'IHM ou parfois appelé aussi fond d'IHM correspond à la partie statique ou fond de plan (Kolski, 1997). Elle est constituée d'informations non modifiables, restant en permanence à l'écran comme le système de menu. Son but est d'aider l'opérateur tant sur la navigation à travers le logiciel que sur l'identification, l'interprétation, la mémorisation et l'utilisation constituant la vue considérée. Cette partie peut être assimilée à une mémoire externe ou annexe de l'opérateur.

On distinguera le fond de l'IHM aux éléments constitutifs de la vue de supervision qui correspondent à la partie dynamique ou partie animée. Cette partie est constituée d'informations animées. Les informations dynamiques permettent de suivre les évolutions quantitatives et qualitatives des variables et des tendances au cours du temps.

La partie dynamique des logiciels propose différents types de fonctions évoluées par exemple (le symbole, le message, barre graphe, cadran, compteur, courbe).

2.1.2. Approche de conception

Une double approche de conception a été mise en place pour la réalisation du fond d'interface, écologique et centré utilisateur. Selon Rasmussen (1989) une interface de supervision au sein d'un système complexe se doit d'être conçue sur une structure définie par une analyse du domaine de travail. Cette analyse est primordiale si on souhaite soutenir l'activité de l'opérateur, en particulier lors de situations non anticipées.

Cependant, les méthodes de la conception écologique ne nous permettent pas d'avoir une connaissance des stratégies et procédures que l'utilisateur doit effectuer (Terrier et al., 2001). Cela peut potentiellement amener à omettre de possibles contraintes.

Nous avons donc combiné les méthodologies écologiques présentées précédemment et une approche centrée utilisateur telle que préconisée par Maguire, (2001) qui soulignent l'importance de la prise en compte des utilisateurs et de la notion d'utilisabilité dans la conception de système. Pour cela, il conseille une conception centrée utilisateur basée sur leurs participations actives et une prise en compte de leurs besoins et des exigences qui leurs sont imposées. Il synthétise les différentes méthodes (l'analyse des besoins, des existants, l'inspection ergonomique...) permettant de rendre une interface utilisable.

2.1.3. Méthodologie

Tout d'abord, une conception écologique de l'interface commençant par une analyse du domaine de travail a été réalisée sur le domaine du « navire ». Les capacités et limites cognitives des opérateurs ont ensuite été prises en compte dans un second temps via la taxonomie SRK. Trois principes fondamentaux ont de plus tout particulièrement été appliqués : la perception directe, la manipulation directe et le visual momentum. L'application de ces principes favorisera le support des éléments de la taxonomie SRK.

Dans un second temps, la conception a été complétée par une approche centrée utilisateur et utilisabilité. Cela a permis de combler certains manques de l'approche écologique, notamment en termes de prise en compte des procédures existantes, des besoins et des difficultés de l'opérateur. Cette deuxième étape a permis de faire en sorte que l'interface supporte l'opérateur dans des situations classiques et connues. Elle a également permis de guider la mise en place des différentes données de notre hiérarchie d'abstraction sur l'interface. La démarche centrée utilisateur s'est matérialisée par la réalisation de 12 entretiens semi-directifs auprès d'utilisateurs finaux, experts navigants à l'École Nationale Supérieure Maritime de Nantes.

2.1.4. Résultats

Trois tâches principales structurent l'activité des opérateurs en salle machine : la supervision, la commande et la gestion des alarmes. La construction du nouveau fond d'IHM a comme objectif de soutenir ces trois activités.

Pour répondre à ces différentes exigences, trois points ont été traités : l'architecture de l'information, le parcours opérateur, les fonctionnalités de l'interface et le zoning des pages de l'interface.

2.1.5. Architecture de l'information

L'architecture de l'information correspond à la structure d'organisation sous-jacente d'un système de contenu (Boucher, 2010). Par l'analyse du domaine de travail, nous avons pu établir la hiérarchie de l'information présentée dans la Figure 54.

Cette hiérarchie est composée de quatre grands types d'informations, allant d'une représentation générale (Synthèse navire) à une représentation plus fine située au niveau composant (synoptique). L'objectif sera que notre interface comporte ces différents niveaux de descriptions et se calque sur le principe de raisonnement d'un opérateur (Vicente, 1999). La Figure 54 illustre l'architecture de l'information.

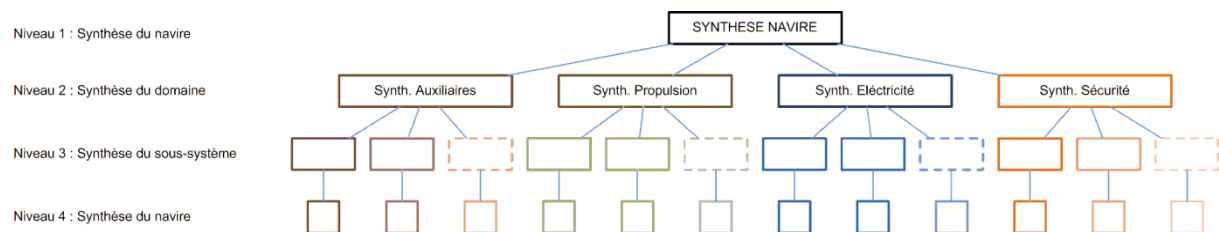


Figure 54 : Architecture de l'information

Le Niveau 1- Synthèse navire présente les informations liées aux objectifs fonctionnels et aux contraintes extérieures régissant le système à son niveau d'agrégation le plus général. Par exemple l'état général du navire, les données de navigation...

Le Niveau 2- Synthèse système - correspond aux informations liées aux objectifs fonctionnels des systèmes. Quatre domaines ont été définis (auxiliaires, propulsion, électrique et sécurité). Pour chacun de ces domaines, nous disposons d'un résumé des objectifs de tous les sous-systèmes qu'ils comportent. La Figure 55 illustre la page synthèse système, avec de présent la synthèse du système d'eau douce sanitaire. La page synthèse système peut contenir jusqu'à 9 synthèses simultanément.

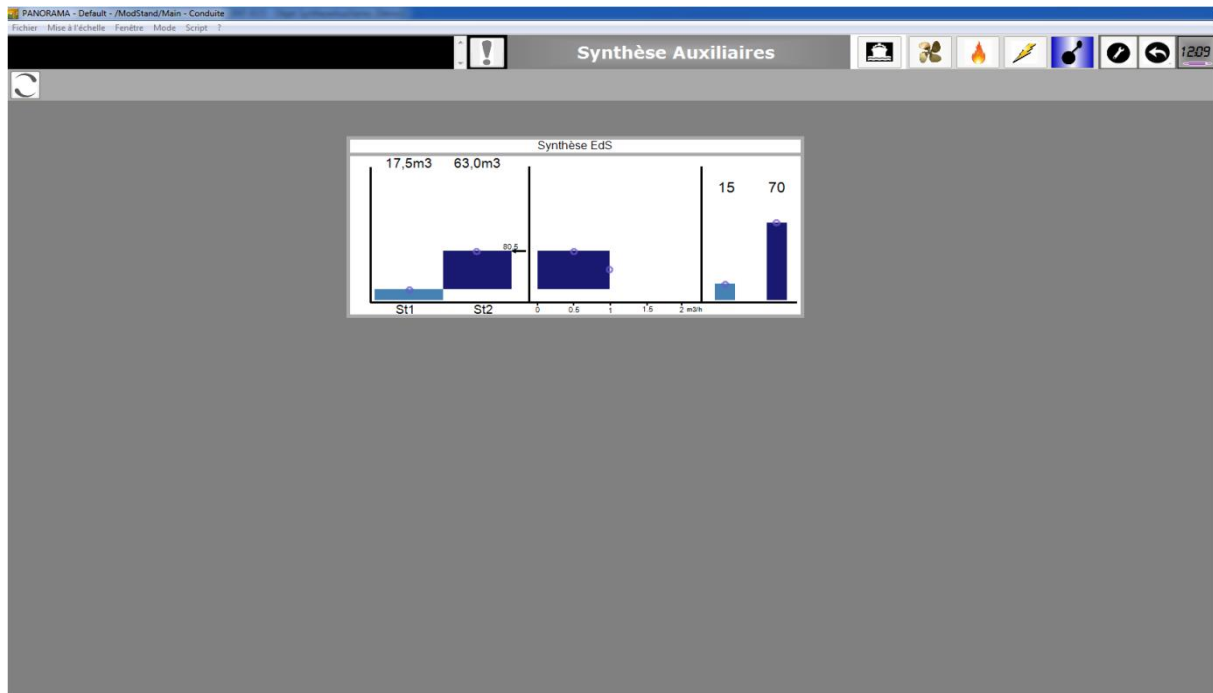


Figure 55 : Page synthèse système

Le Niveau 3- Synthèse de haut niveau – est la représentation d'un sous- système à un niveau d'abstraction plus concret (fonction abstraite et processus). Elle correspond à la synthèse détaillée d'un sous-système donné, appartenant à un domaine particulier. Par exemple, le sous-système EDS fait partie du domaine Auxiliaire.

Le Niveau 4- Synthèse de bas niveau - regroupe les représentations d'un sous-système au niveau le plus concret (fonction physique, forme physique). Généralement on pourra y visualiser les informations sous forme de synoptique (Burns & Hajdukiewicz, 2013).

2.1.6. Parcours opérateurs

Pour suivre les principes de la conception écologique et du cheminement cognitif d'un opérateur, le chemin descendant est favorisé. Les informations vont de la Synthèse navire au Synoptique. L'accès au synoptique d'un sous-système nécessite au préalable de visualiser la Synthèse de haut niveau de ce sous-système et de la synthèse des sous-systèmes. L'opérateur a la possibilité de remonter dans la hiérarchie s'il le souhaite, via les onglets de navigation. La Figure 54 illustre les 4 niveaux de la structure de l'information du système.

2.1.7. Fonctionnalités de l'interface

L'analyse hiérarchique des tâches et l'analyse des besoins ont permis de définir différentes fonctionnalités de l'interface. L'opérateur doit avoir un accès direct aux différentes alarmes. Une zone « alarme » sur toutes les vues de l'interface a donc été intégrée. Elle permet de voir les trois dernières alarmes déclenchées et aussi d'acquitter

l'alarme si nécessaire (qui passe alors de rouge à orange). Un accès à l'ensemble des alarmes via cette sous-zone est possible en cliquant sur l'espace alarme. Celle-ci contient les alarmes acquittées, non acquittées, les sécurités enclenchées et l'historique des alarmes. Pour chaque alarme, il est signifié : le numéro de l'alarme, son nom, son libellé, son état, l'heure et la date, de plus un onglet permet un accès direct au système concerné par l'alarme.

L'opérateur doit pouvoir exécuter des commandes automatiques et manuelles. Deux onglets à cet effet sont présents : AUT ou MAN. Les commandes manuelles s'effectuent directement sur les éléments du synoptique (par exemple : ouvrir une vanne), les commandes automatiques nécessitent de faire un choix entre différentes commandes pré établies (par exemple : transfert). Il est possible d'accéder à une page commande récapitulant celles qui sont en cours ainsi qu'à l'historique.

2.1.8. Présentation de l'interface

L'interface a ainsi été décomposée en trois zones distinctes (Figure 56). Une zone fixe qui comprend des éléments essentiels devant être visibles et accessibles en permanence. La sous-zone d'alarme, la sous-zone titre et la sous-zone menu. La sous-zone menu va permettre un accès direct à la synthèse du navire, mais aussi à la synthèse des systèmes auxiliaires, propulsion, sécurité et électrique. Une zone semi-fixe qui comprend les commandes et la navigation au sein de l'interface. Cette zone est semi-fixe, car les possibilités d'actions sont différentes selon la situation. Via cette zone, l'opérateur peut effectuer des commandes automatiques ou manuelles. Cette action sera accessible uniquement en synthèse sous-système ou sur le synoptique. Une zone non fixe qui est la zone de visualisation. Les éléments de cette zone changent en fonction des systèmes visualisés et du niveau d'abstraction. Depuis cette zone des flèches fixes sur le côté gauche et droit permettent une navigation intra niveau (par exemple au sein du niveau N2), et des flèches sur le haut et le bas permettant la navigation inter niveau (par exemple des informations de haut niveau vers les niveaux de bas niveau comme le synoptique).

Afin de favoriser la perception directe et la manipulation directe, il a été décidé de remplacer les menus déroulants par des icônes représentatives (Bennett & Flach, 2011). Les icônes choisies pour représenter ce niveau proviennent de la littérature et de pré tests iconique. Les onglets survolés et cliquables présentent un contour bleu. Cela permet à l'opérateur de distinguer les éléments cliquables. De plus lorsqu'une icône est survolée un pop-up apparaît signifiant à l'opérateur l'intitulé de l'icône survolée. Les onglets sélectionnés présentent un contour bleu persistant, notamment pour les onglets de domaine lorsque l'onglet est actif. Ainsi l'opérateur visualisant par exemple la synthèse du système Eds, sait que ce système correspond au domaine auxiliaire.

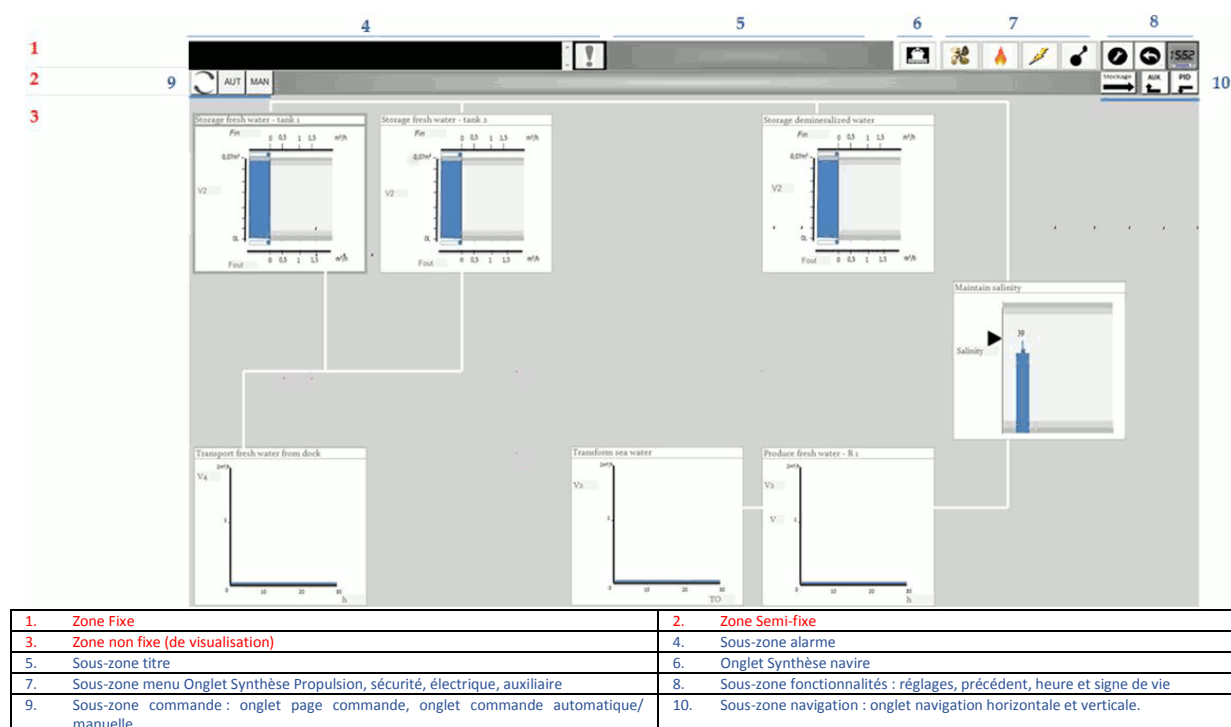


Figure 56 : Présentation de l'interface

2.2. Code couleurs

2.2.1. Parties dynamiques et widgets

Un des principaux principes nous ayant guidé dans le choix du codage couleur est celui, visant à améliorer la conscience de la situation de l'opérateur. La conscience de la situation est définie par Endsley & Jones, (2013) comme « la perception des éléments d'un environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans un futur proche. »

Pour cela, dans un premier temps l'ensemble des éléments graphiques générés par Anaxagore dans la bibliothèque écologique d'élément graphique ont été normalisés. Ces éléments de conception peuvent être des symboles ou des affichages optimisés pour communiquer des informations clés à l'opérateur disposant d'une formation minimale et d'une charge cognitive réduite. Ces éléments de conception sont optimisés pour permettre l'accès à tous les niveaux de la vue d'ensemble de la situation (perception, compréhension, projection) et la gestion du processus associé.

Comme le montre la Figure 57, les mesures qui indiquent les points d'alarmes clés, les limites opérationnelles, les limites optimales par catégorie, les limites de seuils et la valeur actuelle en contexte fournissent bien plus d'informations et améliorent nettement la vue d'ensemble de la situation pour l'opérateur. Grâce à cette représentation, l'opérateur peut repérer d'un coup d'œil si la valeur est anormale. Cet outil combiné à une analyse de tendance peut non seulement communiquer l'état actuel du système, mais également le mouvement directionnel et sa vitesse, permettant à l'opérateur de prévoir la position dans

le futur et de déterminer si une action est justifiée. Les tendances sont l'une des méthodes les plus efficaces pour atteindre le niveau « projection » de la vue d'ensemble de la situation pour la valeur donnée.

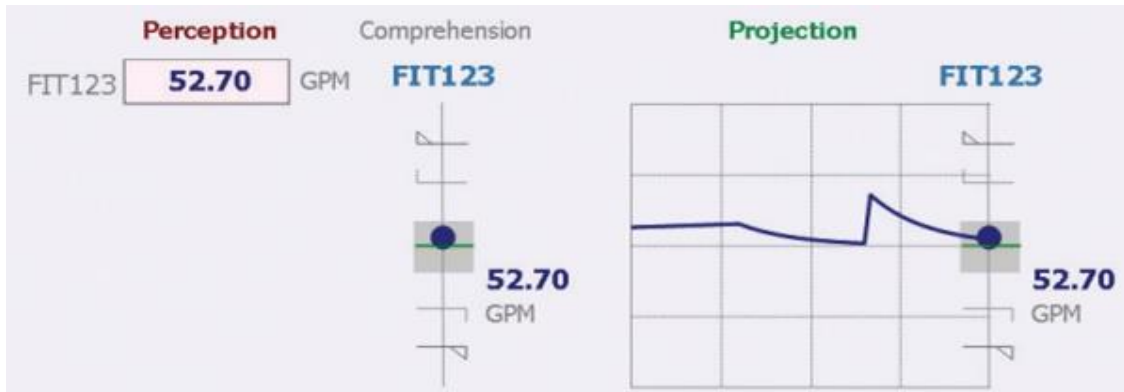




Figure 57 : Modèle de la conscience de la situation

Dans un second temps, nous nous sommes donc attachés à la codification couleur et aux animations graphiques des éléments de notre interface. Il est courant que les applications graphiques soient utilisées comme des vitrines de reproduction ultra graphique des processus industriels. Cependant ces approches graphiques très élaborées peuvent empêcher l'opérateur de percevoir la situation telle qu'elle est réellement et de prendre des décisions clés pour améliorer la valeur économique de l'application.

Pour favoriser la conscience de la situation, on favorisera une interface épurée en termes du nombre de couleurs, afin que l'opérateur accorde toute son attention aux points du processus qui ne sont pas conformes à l'état normal ou prévu. Ainsi lorsque l'état du système est totalement conforme aux attentes, les graphiques du processus ne doivent pas attirer l'attention de l'opérateur sur ces conditions normales afin de ne pas le surcharger d'informations. Les animations doivent être proposées pour attirer le regard et pas seulement pour produire un aspect graphique saisissant. Si les opérateurs sont distraits par des pompes tournantes par exemple, ils auront du mal à repérer une valeur de processus excédant les limites opérationnelles. La couleur ne doit jamais être la seule méthode utilisée pour transmettre une valeur ou un état, mais elle est un outil très efficace pour attirer l'attention de l'opérateur. Pour garantir une conception optimale de l'IHM, il est primordial de définir une charte de couleur et de s'y tenir. La Figure 58 représente le code couleur choisi pour être appliqué au widget écologique. Pour un état déviant, une couleur rouge sera employée. Le rouge est par usage la couleur associée à un état anormal. Pour représenter les données des graphiques, un codage couleur tournant autour d'une déclinaison de bleu a été choisi. Le bleu est une couleur « pâle » tandis que le rouge est une couleur active ou vive. Dès qu'un état déviant est en cour la couleur rouge émergera plus directement à l'opérateur dans le cet ensemble de déclinaison de couleur bleue. Ainsi, il sera recommandé d'utiliser une palette de couleur pâle ou n'attirant pas le regard comme le gris ou le bleu pour signifier un état normal et d'utiliser une couleur vive comme le rouge pour signifier un état anormal.

	Red	Données, Titre, Trait
	Light Coral	Ecart de données









	SteelBlue	Données	A privilégier
	Midnight Blue	Données	
	Powder Blue	Ecart de données	
	Royal Blue	Données	Si besoin de couleurs > 3
	Dark Turquoise	Données	
	LightSkyBlue	Données	
	LightSteelBlue	Ecart de données	Si besoin de couleurs > 6
	StateBlue	Données	

Figure 58 : Code couleur des widgets écologiques

2.2.2. Codes couleurs du contenu des fluides

Sur les interfaces de supervision, les couleurs occupent une place prépondérante. Elles permettent de visualiser les différents fluides qui circulent sur les différents systèmes représentés à l'écran et d'encoder les informations visuelles sur une interface, car elles permettent d'identifier des éléments, des états ou des informations de manière plus rapide (So & Smith, 2002). Ainsi pour que le codage couleur permette d'identifier efficacement les informations encodées, il faut éviter toute confusion possible entre les couleurs. Pour cela, il est recommandé de s'assurer que chaque couleur n'ait qu'une signification possible et soit suffisamment distincte des autres couleurs (Cardosi & Hannon, 1999). Par exemple, on préférera choisir deux teintes bien distinctes plutôt que deux nuances proches. De plus, les couleurs doivent être faciles à reconnaître. La perception d'une couleur peut varier en fonction des couleurs qui l'entourent. On choisira la couleur de fond avec un soin particulier. Il est recommandé de respecter un rapport de contraste de 8 :1 pour les éléments ayant besoin d'être lus, et un contraste de 3 :1 pour les éléments n'ayant pas besoin d'être lus (Cardosi & Hannon, 1999). Le rapport de contraste est la propriété d'une image quantifiant la différence de luminosité entre les parties claires et sombres de cette image. Plus une couleur sera contrastée par rapport à sa couleur de fond, plus elle sera correctement perçue.

Actuellement, il n'existe aucune directive officielle concernant le choix des couleurs pour les interfaces de supervision utilisées dans la marine civile et le champ de recherches sur ce sujet est relativement limité. Par ailleurs, il existe une norme pour le codage couleur

des étiquettes de tuyauteries sur les navires (Figure 59), mais qui en tant que telle, n'est pas appliquée directement aux interfaces de supervision navale.

	Fluides	Couleurs saturées	Couleurs désaturées
Codage normalisé	Eau de mer	Vert	
	Eau douce	Bleu	
	Eau distillée	Bleu + Gris	
	Vapeur	Argent	
	Huile	Orange	
	Fioul lourd (HFO)	Brun + Noir	
	Fioul léger (MDO)	Brun + Jaune	
	Eau noire	Noir + Bleu	
	Eau grise	Noir + Blanc	
	Eau de cale	Noir + Vert	
	Boues	Marron	
	Gaz non inflammable	Gris	
	Gaz inflammable	Jaune	
	Air	Blanc	
Codage optimisé	Eau de mer	Vert	
	Eau douce basse température	Bleu	
	Eau douce haute température	Cyan	
	Vapeur	Argent	
	Huile	Jaune	
	Fioul lourd (HFO)	Brun	
	Fioul léger (MDO)	Orange	
	Eaux usées	Noir	
	Boues	Marron	
	Gaz non inflammable	Violet	
	Gaz inflammable	Magenta	
	Air	Blanc	

Figure 59 : Codage normalisé versus optimisé

Pourtant, le choix des couleurs ne devait pas se faire au hasard. Il faut éviter toute confusion possible entre les couleurs. Pour cela, il faut choisir des couleurs faciles à reconnaître et bien distinctes les unes des autres. Or, pour que ce critère soit respecté, il faut choisir les couleurs les plus pures possible (rouge, vert, bleu, jaune, cyan, magenta), ce qui implique généralement un haut niveau de saturation et de luminosité. Or, pour faciliter la détection des alarmes, il faut privilégier les couleurs hautement lumineuses et saturées. Ce qui est donc paradoxalement en contradiction avec le principe évoqué précédemment. Nous nous retrouvons alors face à deux critères importants s'excluant mutuellement. Une expérimentation a donc été menée dans le but d'évaluer lequel de ces paramètres était le plus efficace pour l'opérateur pour détecter les éléments à l'écran. Au cours de cette expérience, une vingtaine de sujets ont effectué une série de tâches de recherche

d'informations sur des schémas synoptiques. Deux codages couleurs étaient employés l'un basé sur la norme et l'autre sur un code couleur optimisé basé sur des recommandations ergonomiques (Figure 59). Les sujets devaient pointer un élément demandé avec la souris et répondre à un questionnaire d'évaluation de la charge mentale : Le NASA-TLX (adapté en version française par Cegarra & Morgado, (2009)). Le taux de réussite en recherche d'information est apparu élevé dans les deux conditions, sans différence particulière entre les deux types de codages. Le temps de recherche d'informations ne diffère pas de manière significative non plus entre les deux conditions. Par contre, l'on dénote que les participants avec le codage optimisé ont détecté un peu plus d'alarmes avec les couleurs désaturées que lorsqu'elles étaient saturées. De même, le score de charge mentale des participants ayant le codage normalisé est plus élevé que pour les participants utilisant le codage optimisé. Le codage optimisé apparaît comme le codage le plus approprié et il semble plus important de favoriser l'identification des fluides à travers des couleurs bien identifiables et bien distinctes que de favoriser la saillance visuelle des alarmes à travers des couleurs désaturées, mais proches.

3. Intégrations de la démarche écologique dans le flot

3.1. Modèles d'entrée

À notre connaissance aucun outil n'a été proposé dans la littérature avec pour objectif de transformer des informations issues d'une analyse de domaine de travail en des prototypes d'interfaces écologiques composés de représentations graphiques suivant les principes de semantic mapping (voir Chapitre 1 page 55). Nous avons essayé de combler ce vide en réutilisant, à la fois, le schéma d'entrée de données déjà existant dans la première version d'Anaxagore puis en proposant une nouvelle interface d'entrée de données destinées à compléter les informations utiles avec des informations de haut niveau. L'outil TMTA évoqué dans le chapitre précédent aura effectué au préalable le travail de vérification et validation des informations introduites dans les différents modèles d'entrées garantissant ainsi la qualité des informations rentrées dans les deux schémas.

3.1.1. *Le schéma d'entrée de bas niveau*

Le premier schéma d'entrée est issu de la première version d'Anaxagore. À ce niveau un concepteur réalise un schéma sous le logiciel Visio regroupant toutes les informations fonctionnelles du système comme les objets physiques fonctionnels utilisés pour réaliser les fonctions de haut niveau (Exemple : Osmoseur pour produire de l'eau, la caisse d'eau numéro 1 pour stocker de l'eau, un groupe hydrophore pour transporter l'eau...). La Figure 60 illustre le schéma d'entrée de bas niveau pour le système d'eau douce sanitaire. Également ce niveau identifie les capacités et limites de ces objets physiques et les capteurs

présents sur le circuit. Ce niveau d'entrée sert de porte d'entrée aux informations sur les niveaux fonctions physiques et formes physiques de la hiérarchie d'abstraction. Ce schéma ne permet pas au concepteur de saisir des informations de plus haut niveau et par conséquent d'acquérir toutes les informations nécessaires pour finaliser la hiérarchie d'abstraction sur les niveaux tels que les objectifs généraux, les fonctions abstraites ou bien encore les fonctions généralisées. Ce niveau est pour le moment réalisé sur un fichier Visio indépendant du second schéma d'entrée de haut niveau pour des raisons techniques. Les perspectives sont à terme d'avoir un seul et unique fichier Visio, ce schéma d'entrée devenant ainsi la page 4 du fichier Visio principal, l'objectif est d'avoir dans le même fichier l'ensemble des niveaux d'abstraction.

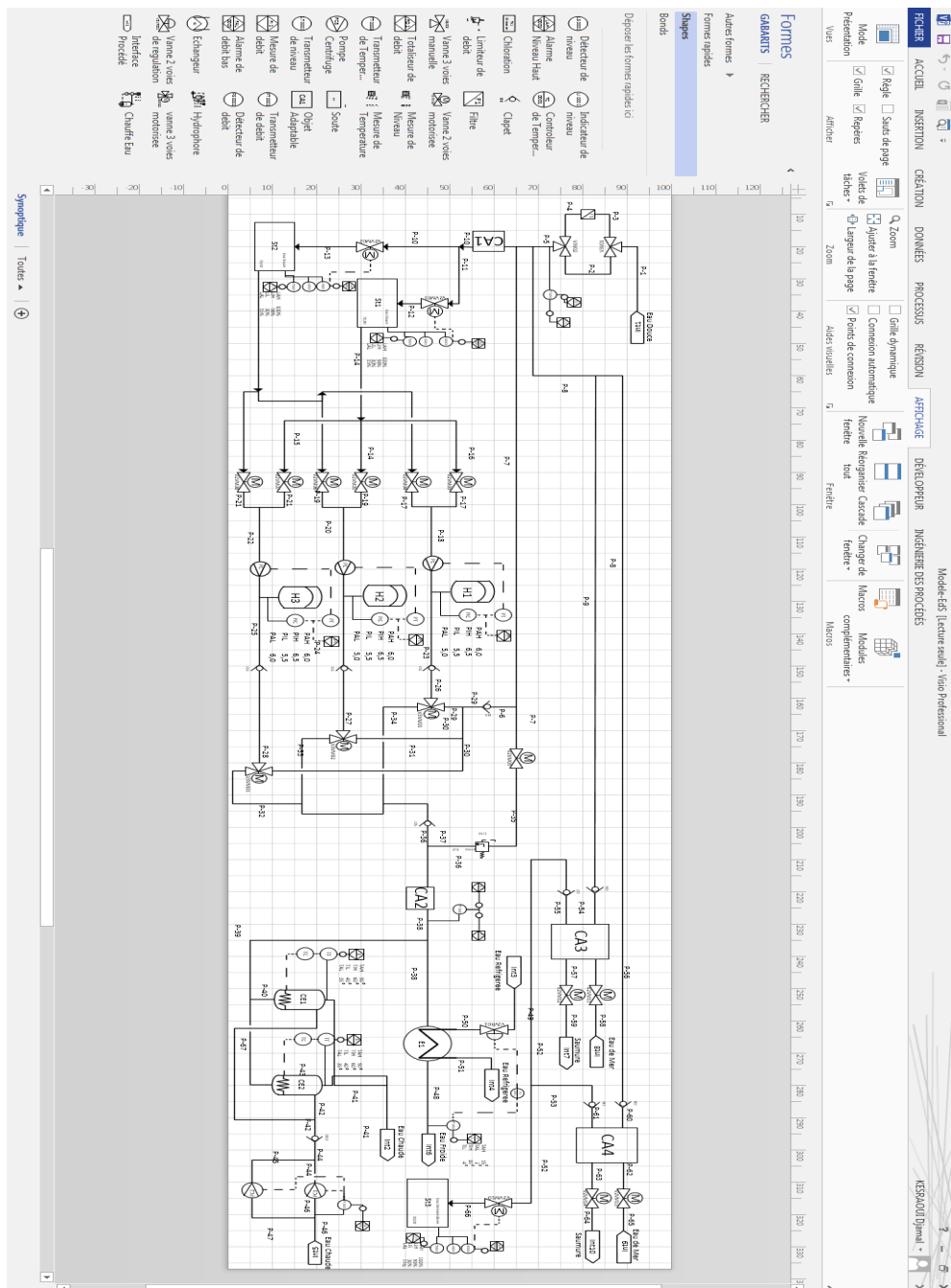


Figure 60 : Schéma d'entrée de bas niveau

3.1.2. *Le schéma d'entrée de haut niveau*

La création d'un nouveau et second fichier s'avère donc nécessaire pour compléter le schéma d'entrée de bas niveau et compléter, par la même, l'entrée des informations utiles à la construction de la hiérarchie d'abstraction. Ce second schéma va également permettre d'organiser les informations en fonction des liens fonctionnels qui les unissent.

L'objectif de ce schéma est de collecter les informations de haut niveau. Il s'agit donc de définir dans un premier temps quel type d'information doit être rentré pour chacun des niveaux désirés grâce à l'analyse du domaine de travail puis de remplir ensuite les schémas de haut et bas niveau à l'aide de ces informations. Skilton et al (2002) proposent un outil d'aide à la conception d'une analyse de domaine, nous proposons ici un outil d'aide à l'utilisation de ces données dans le but de les transformer et les intégrer à une interface écologique. Les deux outils sont donc complémentaires. L'analyste associé à un ingénieur définissent comment récupérer les informations dégagées de l'analyse du domaine et requises pour concevoir l'IHM (par exemple à l'aide de capteurs ou par des techniques de déduction d'informations).

Pour la conception de ce schéma, un modèle d'entrée similaire à celui proposé par Liu, Nakata, & Furuta, (2002), a été mis en place. Le concepteur est amené à réaliser un schéma d'entrée des processus décrivant le système. Sur la base des processus sélectionnés et de l'analyse du domaine effectuée préalablement, le concepteur complète des tableaux de données propres à chaque processus où pour un processus, un objectif général et des informations sur les fonctions abstraites sont associés. Cette association à un processus, d'objectifs, et d'éléments assimilés aux fonctions abstraites, correspond aux liens «pourquoi ? Comment? », propre au fonctionnement d'un domaine de travail. Les fonctions abstraites seront assimilées aux différents types de variables liés aux processus (volume, débit, masse, température...). Les objectifs généraux rentrés par le concepteur correspondront au nom du widget et à la relation mathématique choisie pour associer les variables liées aux fonctions abstraites entre elles. Ce modèle d'entrée est réalisé sous Visio. La Figure 61 correspond à l'interface pour la conception de schéma d'entrée des informations de haut niveau.

Sur le côté de l'interface, le concepteur dispose d'une liste de processus basée sur les 8 processus de base définis par Liu et Nakata (Tableau 16). Ces processus sont appelés « objet processus ». A l'aide d'un drag and drop et de traits de connexion reliant les « objets processus », le concepteur crée un schéma correspondant au schéma fonctionnel tel que le définissent Naikar, Hopcroft, & Moylan, (2005). Puis dans une seconde étape, le concepteur spécifie en double cliquant sur « l'objet processus » les relations mathématiques qui unissent ces variables et les objectifs du sous-système. Il ouvre alors une boîte de dialogue avec le titre et les variables associées. Les relations mathématiques, sur la base de la technique du semantic mapping, sont associées à une représentation graphique spécifique

située dans la bibliothèque de widget écologique. Les relations mathématiques servent donc à déterminer quelle représentation graphique sera associée à tel processus.

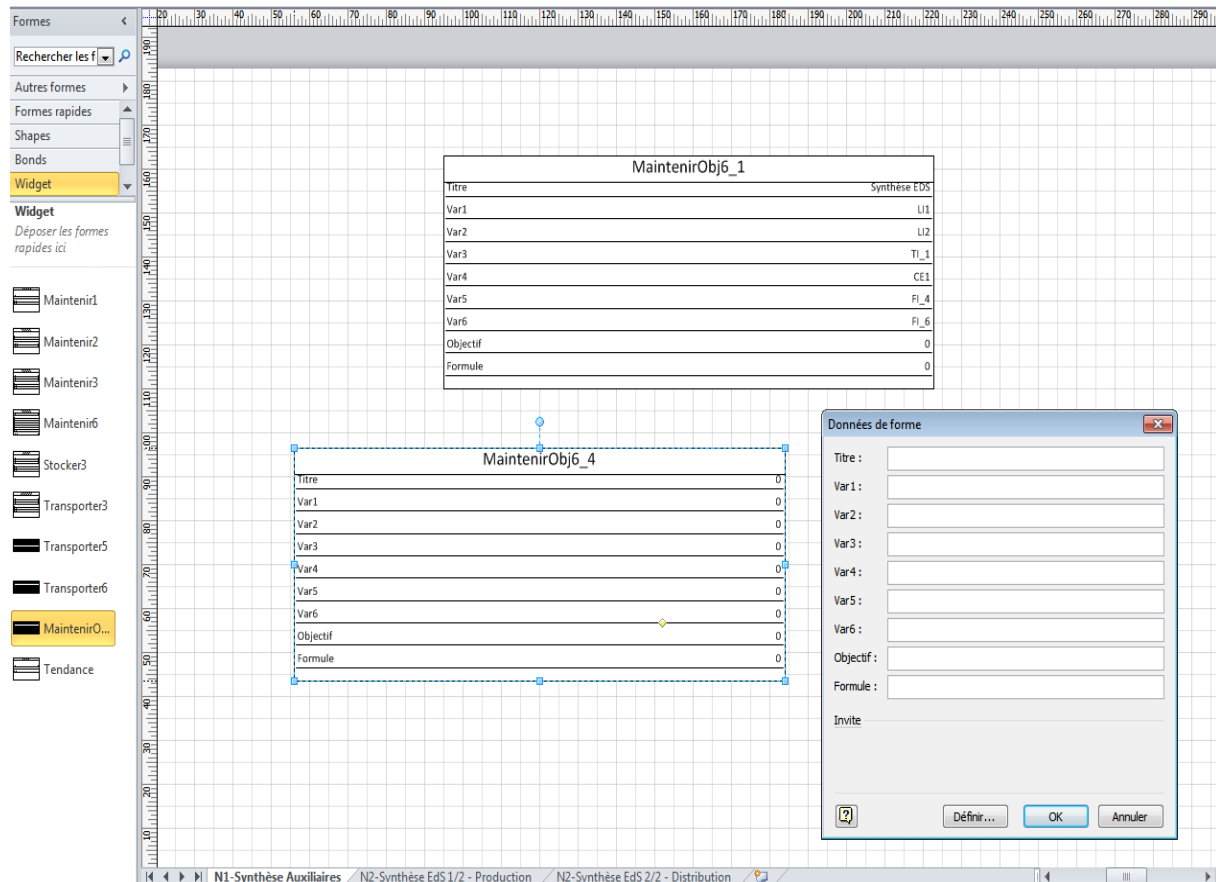


Figure 61 : Interface d'entrée de données pour les informations de haut niveau

Tableau 16 : Listes des fonctions primitives (Naikar et al, 2003)

Classes de fonctions primitives	Synonymes
Générer	Créer, former, produire, introduire, fournir
Stocker	Déposer, remplir, conserver
Transporter	Déplacer, passer, transmettre, transférer
Transformer	Changer, convertir, transmuter
Équilibrer	Maintenir, garder, préserver, tenir
Bloquer	Prévenir, interdire, éviter
Perdre	Consumer, vider, décharger
Additionner	Sommer, rajouter

Quand l'opérateur complète les données de l'objet « processus », il renseigne toutes les données nécessaires pour animer et spécifier le widget écologique. De même, la structure du schéma construite par drag and drop, sera celle qui sera représentée sur le prototype d'interface finale. Enfin une structure basée sur un système de pagination permet de reproduire les niveaux d'agrégation de la matrice. Le système de pagination actuelle impose de compléter au moins trois pages, l'une destinée à la synthèse de haut niveau représentant les informations au niveau d'agrégation le plus grossier (le système), l'autre destiné au niveau d'agrégation inférieure (le niveau sous-système) et enfin une dernière

consacrée aux informations de bas niveau (voir schéma de bas niveau). La synthèse navire est pour le moment construite de manière indépendante.

Le concepteur crée au moins trois pages correspondant chacun à un niveau d'agrégation différent (niveau système et niveau sous-système).

Pour un niveau d'agrégation donné, l'on ne disposera donc pas des mêmes niveaux d'abstractions en termes d'informations. Pour le niveau d'agrégation « systèmes », seuls les objectifs généraux et fonctions abstraites seront affichés, pour le niveau d'agrégation « sous-systèmes » seuls les objectifs généraux, fonctions abstraites et fonctions généralisées seront affichés et enfin pour le niveau d'agrégation « composants » seuls les niveaux fonctions et formes physiques seront affichés. La Figure 62 illustre les cases couvertes par les différents schémas d'entrées. Les informations couvertes représentent une diagonale allant des niveaux les plus abstraits de la matrice du domaine de travail au niveau les plus concrets. Ce cheminement a été sélectionné, car il est représentatif du cheminement opéré par les opérateurs dans la matrice (Bisantz & Vicente, 1994).

	Système (Navire)	Sous-système (EDS,...)	Composants (Vannes, pompes, ...)
Objectif fonctionnel	Synthèse navire Page 1	Synthèse sous système Page 2	
Fonction abstraite		Page de haut niveau Page 3	
Processus		Page de haut niveau Page 3	Page de haut niveau Page 4
Fonction physique			Page de bas niveau Page 4
Forme physique			Page de bas niveau Page 4

Figure 62 : Architecture de l'information

L'ordre du système de pagination correspond à l'ordre d'apparition dans l'architecture de l'information du système de supervision (Figure 62). La page 1 générera la synthèse de haut niveau qui dans l'ordre d'apparition des pages sera la première. Puis la page 2 apparaîtra en deuxième et ainsi de suite. Cette disposition permet de concevoir une architecture de l'information calquée sur la matrice du domaine de travail.

Le nombre d'informations de haut niveau pouvant être extrêmement élevé pour un sous-système donné, il peut être nécessaire d'avoir deux pages. Cette situation se retrouve par exemple avec le système d'eau douce sanitaire. Le concepteur aura alors la possibilité de créer plusieurs pages de niveau 2 (N2) ceci lui offrant l'opportunité de séparer en deux parties le schéma structuro-fonctionnel et par conséquent d'afficher sur deux écrans les informations de haut niveau liées aux sous-systèmes (Figure 63 et Figure 64). Le déplacement se fait par l'intermédiaire de flèche sur la gauche et la droite du circuit.

Par la suite, toutes les informations en entrées sont intégrées dans une représentation graphique appelée widget écologique. Ces widgets écologiques sont eux-mêmes intégrés à un modèle d'IHM standard. Nous présenterons dans le point suivant le modèle d'IHM standard et les différents éléments de la bibliothèque de widgets écologiques.

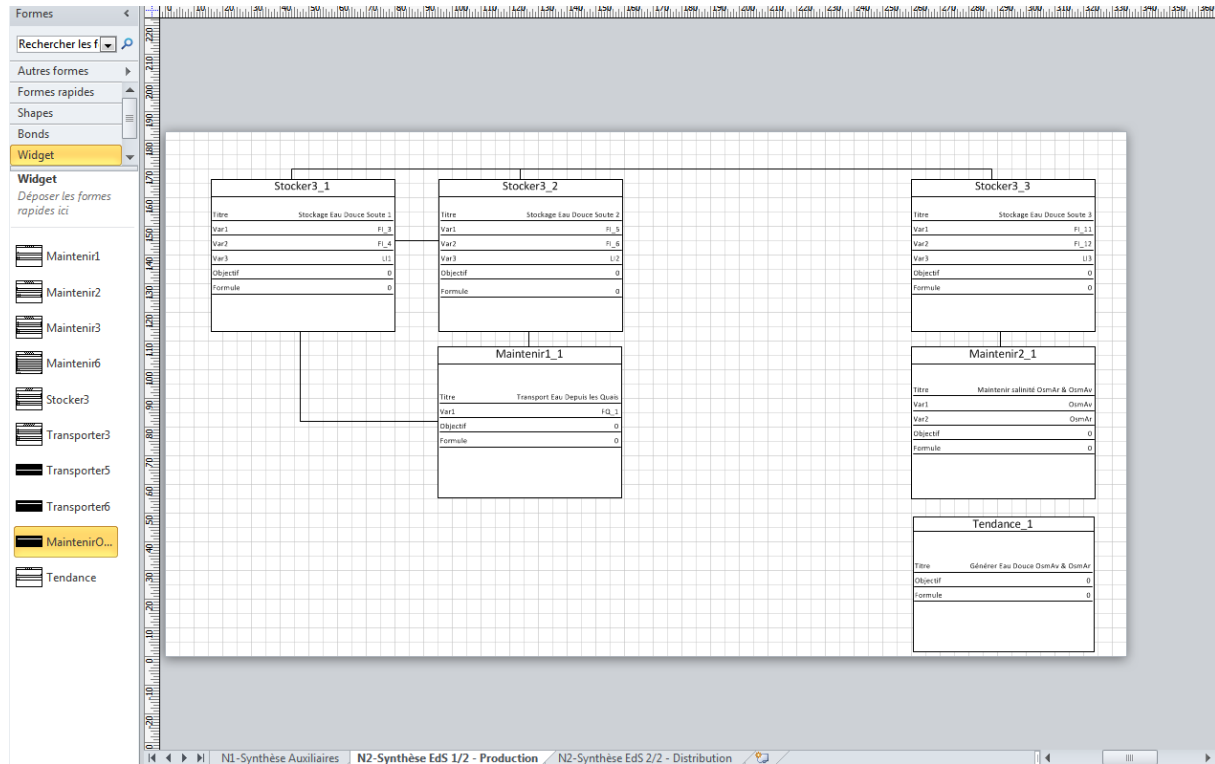


Figure 63 : Page N2 1/2

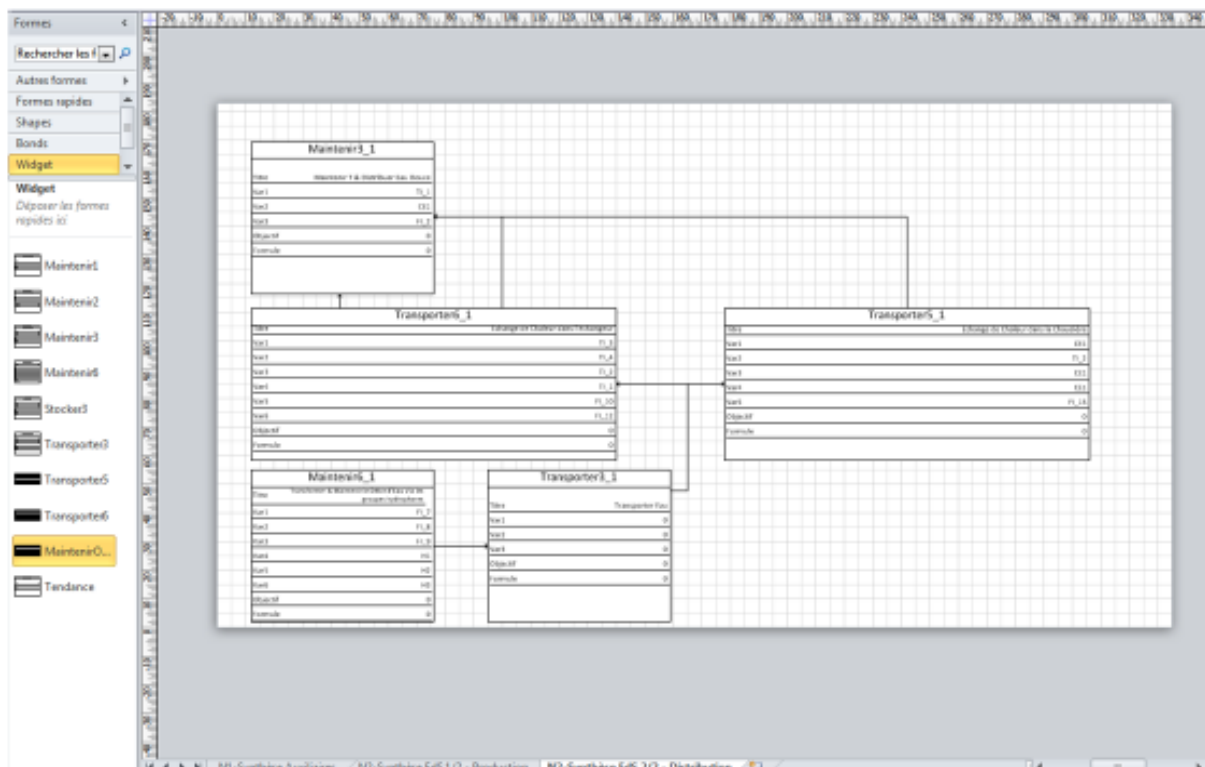


Figure 64 : Page N2 2/2

3.2. La bibliothèque d'éléments écologiques

À l'heure actuelle, l'on retrouve une dizaine de formes de visualisations différentes dans la bibliothèque d'Anaxagore, catégorisables selon différents critères (Affichage analogique avec mémoire, barre graphe avec marqueur temporel, bar graphe comparatif, barre graphe sommatif, affichage par déformation, affichage analogique sans mémoire) et reposant sur plusieurs principes présentés dans le chapitre 1. L'ensemble des widgets ont été sélectionnés et construits dépendamment des possibilités offertes par le logiciel Panorama E2, ce qui dans certains cas a pu contraindre tout ou une partie des choix de conception. Chacune de ces formes de visualisations est attachée à un des processus primitifs définis par Liu et al (2012). Chacun des processus se voit attacher à plusieurs types de widgets possibles. Cette déclinaison de widget a pour objectif de couvrir la multitude de relations mathématiques pouvant rassembler un ensemble de variables entre elles.

La structure dynamique est dépendante d'information en temps réel. Il faut donc réfléchir à une forme de visualisation adaptative au contexte des données et du type de données que l'on peut y rencontrer. Enfin l'ensemble de ces widgets respectent et suivent les principes du Semantic mapping (Hansen, 1995).

3.2.1. Widget processus : additionner/transformer/maintenir (Figure 65)

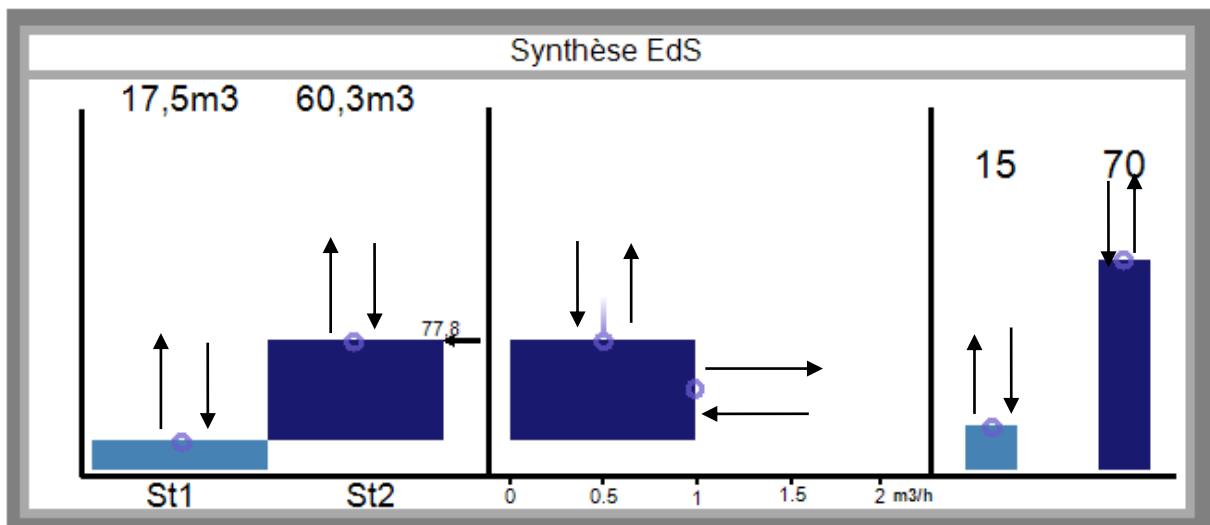


Figure 65 : Widget processus : « additionner/transformer/maintenir »

Ce widget correspond à l'association de 3 processus : « additionner, transformer et maintenir ». Il est construit sur la base de trois autres widgets écologiques. Sa construction est donc particulière est différente des autres widgets. Cette addition de schéma est spécifique au schéma de synthèse où généralement l'on va synthétiser le sous-système à travers l'utilisation de plusieurs processus clés. Nous proposons donc dans la bibliothèque d'éléments, des widgets écologiques capables de représenter une succession de processus à l'exemple de la Figure 65. Au moment de la création du schéma, le concepteur sélectionne

l'élément caractéristique de la somme de ces trois processus et complète ensuite les informations utiles

3.2.1. Widget 1 : représentation des processus « générer ou perdre »

La Figure 66 illustre le widget qui a pour but de visualiser les processus « perdre » ou « générer ». Il caractérise une relation mathématique entre les variables de type : $f=F(t)$.

La valeur d'une variable est affichée en fonction du temps écoulé. L'opérateur peut moduler l'échelle temporelle selon ses besoins. On peut suivre l'évolution de la variable à l'aide de la courbe d'évolution. On peut donc évaluer la production ou la perte d'une donnée dans le temps. Ce type de représentation est couramment appelée vue tendance ou trend. Il importera que la base de temps soit compatible avec les besoins de l'opérateur. Cet affichage facilite aux opérateurs le contrôle d'un procédé par anticipation (Kolski et al., 1993).

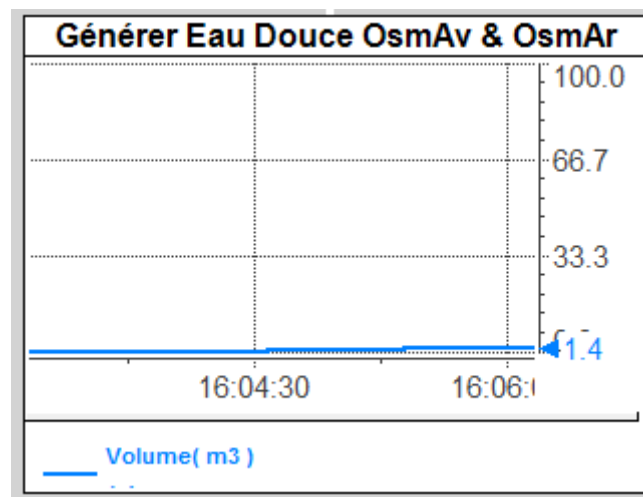


Figure 66 : Widget « Générer » ou « perdre »

3.2.2. Widget 2 : représentation des processus « transporter »

La Figure 67 illustre graphiquement le transfert d'un volume d'eau depuis les quais. Ce type de widget pourra être associé au processus « transporter ». Il représentera les relations mathématiques du type $f= f(x)$. Quand le niveau augmente, la hauteur du rectangle bleu contenu dans le rectangle gris augmente, il y a donc un transport de matière qui se fait. L'échelle sur la gauche permet à l'utilisateur de se situer et une valeur analogique permet également à l'utilisateur de connaître la valeur exacte à un instant t .

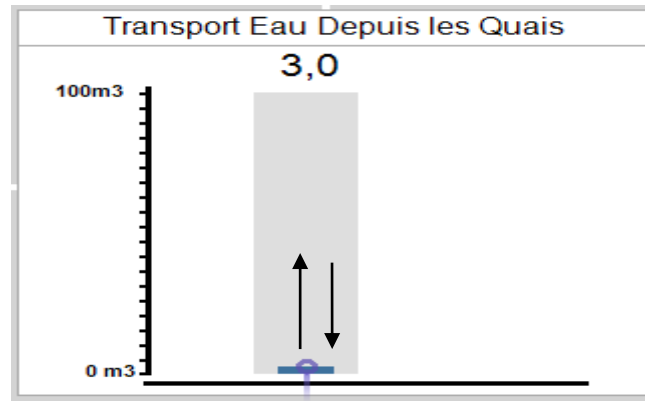


Figure 67 : Widget "transporter"

3.2.3. Widget 3 : représentation de l'association des processus « maintenir et transformer »

La Figure 68 illustre graphiquement les processus « maintenir et transformation » simultanément. Ce type de représentation visualise la valeur d'une variable en fonction du temps, à l'aide du système de trainée et se sert de la transformation de formes géométriques pour illustrer les transformations subies par les variables. Cette représentation se base sur la relation $a \cdot b = \text{aire du rectangle}$, avec « a » la largeur du rectangle et « b » sa longueur. Ainsi en attribuant à « a » et à « b » la valeur d'une variable, l'on peut observer les effets de la variation de l'une ou l'autre des variables à travers l'évolution de l'aspect du rectangle et plus généralement de son aire. Ainsi si « a » correspond à la pression et que la pression dans le système diminue alors la largeur du rectangle va diminuer. Dans ce widget, la largeur du rectangle est associée à l'axe des ordonnées. La valeur des ordonnées, nous est donc donnée par « a ». Cette représentation va donc retranscrire la transformation des variables « a ».

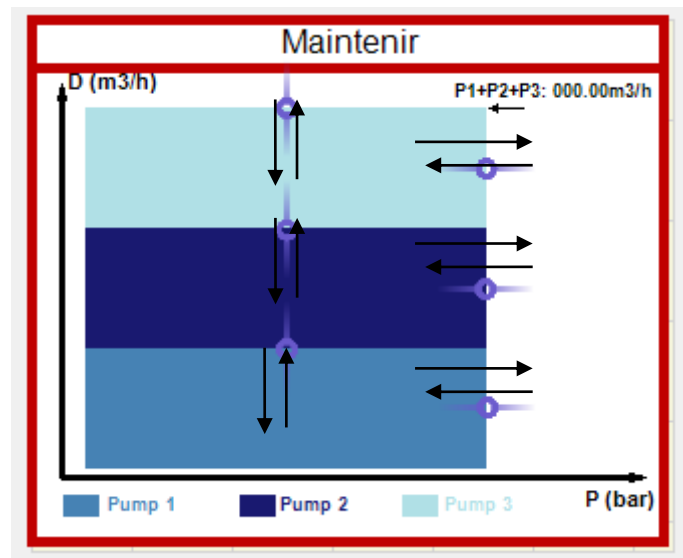
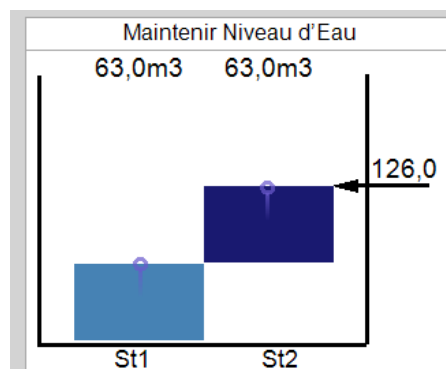


Figure 68 : Widget "transformer + maintenir"

De plus, cette représentation permet de représenter le processus d'additivité des variables en représentant sur un même graphique et sur le même axe des y successivement plusieurs rectangles symbolisant autant de processus de transformation différents. L'addition des valeurs y de chacun des rectangles donne le niveau de la variable y cumulé. La hauteur du premier rectangle débutant au sommet de la hauteur du rectangle suivant. L'augmentation de la pression a pour répercussion l'augmentation du débit. Ainsi, l'addition de la hauteur des trois représentations rectangulaires donne le débit total dans le système. Ce type de widget sera lié à l'association des processus « transformer et maintenir ». Il représente l'équation mathématique $\Delta f = f(x) + f(z) + f(y)$ où $f(x) = a * b$; $f(z) = c * d$; $f(y) = e * f$.

3.2.4. Widget 4 : représentation de l'association des processus « additionner »

La Figure 69 illustre un bar graphe sommatif, ou l'on compare l'état de plusieurs variables de manières sommatives. On représente par un jeu visuel l'addition de ces variables entre elles. Ce type de widget sera associé au processus « additionner ». Il illustrera la relation mathématique : $f = f(x) + f(z) + f(y)$ où $f(x) = a * b$; $f(z) = c * d$; $f(y) = e * f$. Chaque carré représente l'état d'une variable et graphiquement le sommet du rectangle le plus à gauche donne la somme cumulée des deux variables.



3.2.5. Widget 4 : représentation des processus « transporter » à 3 variables

L'affichage par déformation a pour but de visualiser l'état de plusieurs variables simultanément par rapport à un état dit normal de ces variables. Tabourin (89) montre une meilleure identification de l'état anormal avec ce type d'affichage. Ce type d'affichage résulte de travaux montrant que les opérateurs discriminent très rapidement des états anormaux du processus en se référant à des patterns, prenant le plus souvent l'allure de figures se détachant sur un fond (Kolski et al., 1993). L'affichage par déformation est donc adapté à la surveillance d'un ensemble restreint de variables et à la détection d'un

évènement anormal par comparaison à un pattern. Dans la Figure 70, le pattern est le triangle et l'on s'intéresse à l'état de 3 variables (Ddc, Dde, Der). Ddc correspond au débit d'eau chaude, Dde au débit d'eau froide et Der correspond au débit d'eau réfrigérée. La partie gauche de la Figure 70 illustre un état normal de fonctionnement pour l'ensemble des variables tandis que la partie droite illustre un état anormal pour la variable Der. Ce type de widget sera associé au processus « transporter ». Il sera associé à l'équation : $f(x)=f(y)=f(z)$. Si à un moment donné cette équation n'est plus vraie alors il y a un problème sur le processus.

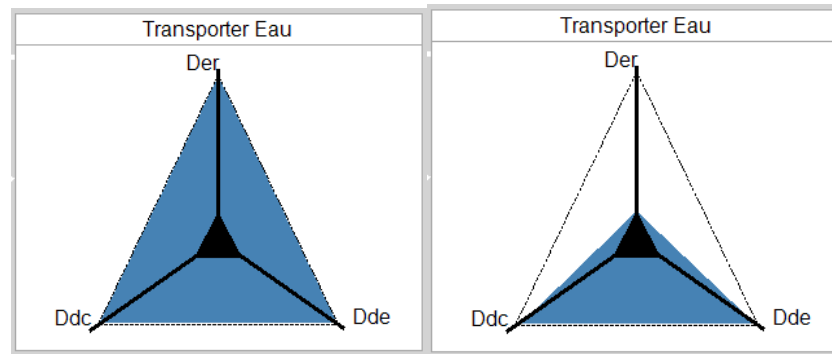


Figure 70 : Widget "transporter"

3.2.6. Widget 5 : représentation des processus « stocker »

La Figure 71 illustre l'application du principe de « semantic mapping ». Le « semantic mapping » est le processus par lequel les relations et contraintes importantes d'un système sont cartographiées en des relations visuelles et graphiques, à l'écran. Les relations sont les régularités physiques et mécaniques qui décrivent le comportement d'un système au-delà du temps. Les contraintes sont les limites qui distinguent dans un système ce qui est faisable ou souhaitable de ce qui ne l'est pas. Ce widget représente les informations liées au processus « stockage ». Il est caractérisé par l'équation mathématique qui unit les variables entre elles de la manière suivante $V \text{ de}/dt = D_{in} - D_{out}$, avec $D = \text{Débit}$. Pour des raisons techniques, il ne nous a pas toujours été possible d'implémenter toutes les solutions graphiques. Par exemple l'heuristique 7 du principe de « semantic mapping » (Hansen, 1995), concernant l'intégration de la dimension temporelle (exemple du tunnel temporel ; voir chapitre 1 page 55) n'ont pu être mis en application.

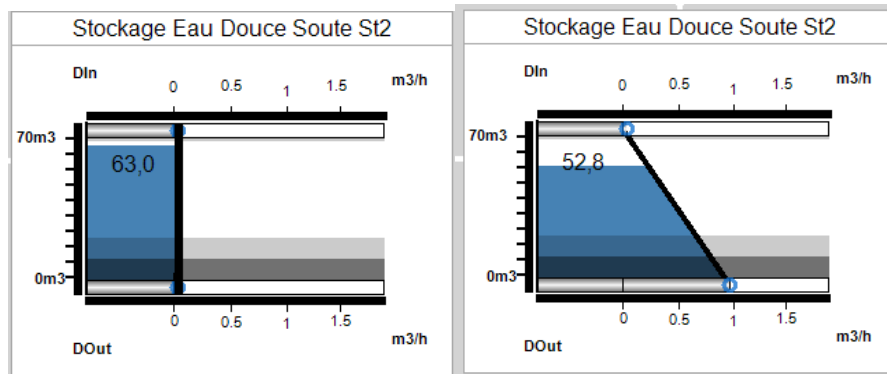


Figure 71 : Widget « stockage 2 »

3.2.7. Widget 6 : représentation des processus « échanger »

La Figure 72 est une représentation graphique par configuration (Bennett & Flach, 2011). Cette approche propose de regrouper entre elles plusieurs représentations fonctionnelles en montrant les liens qui unissent toutes ces représentations. On peut y voir le regroupement des représentations fonctionnelles, au niveau de l'échangeur, entre l'eau réfrigérée et l'eau potable. Les liens entre ces deux représentations sont représentés par le graphique central. Il est très difficile de représenter individuellement toutes les représentations fonctionnelles une par une, car l'espace à l'écran est réduit et il est difficile pour l'opérateur de comprendre efficacement tous les liens qui unissent toutes les représentations fonctionnelles individuelles, la Figure 72 qui est une approche par configuration permet de répondre efficacement à cela.

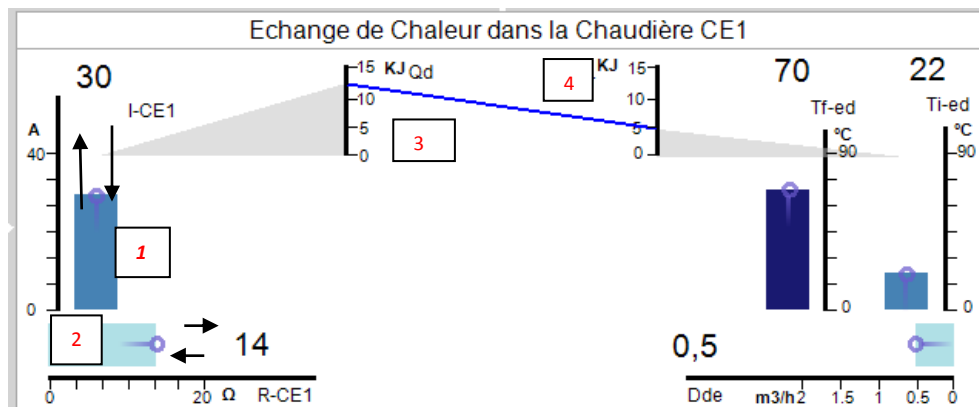


Figure 72 : Widget "échanger"

Ce widget représente les échanges de chaleur entre deux entités, à gauche la chaleur fournie par la résistance ($R^2=Q$) et à droite la chaleur émise par l'eau potable minéralisée [débit*(température finale-température initiale)]. La différence entre la chaleur émise par la résistance et chaleur émise par l'eau douce donne la chaleur reçue par l'eau douce minéralisée en considérant que la chaleur émise par la résistance est plus importante que la chaleur émise par l'eau. Il sera représentatif de la relation mathématique suivante : $f=k*(e2-e1) - k*(e4-e3)$. Ainsi si les variables 1 et 2 évoluent, elles auront un impact sur les données de la variable 3 et par conséquent sur l'état de la variable 4.

4. Implémentation

Le flot de conception a été implémenté avec le système d'eau douce sanitaire embarqué à bord d'un navire. Après avoir développé une analyse du domaine de travail puis après avoir validé cette analyse du domaine de travail avec l'outil TMTA (voir chapitre 2). Nous nous sommes servis de ces résultats pour compléter les deux schémas d'entrées et générer une interface écologique pour le système EDS sur la base du flot de conception Anaxagore 2. La Figure 73 illustre les différentes étapes de cette implémentation que nous présenterons un peu plus dans le détail dans les parties suivantes. Nous illustrerons dans ce chapitre, pour un processus, le principe de génération d'IHM proposé avec le flot Anaxagore version 2.

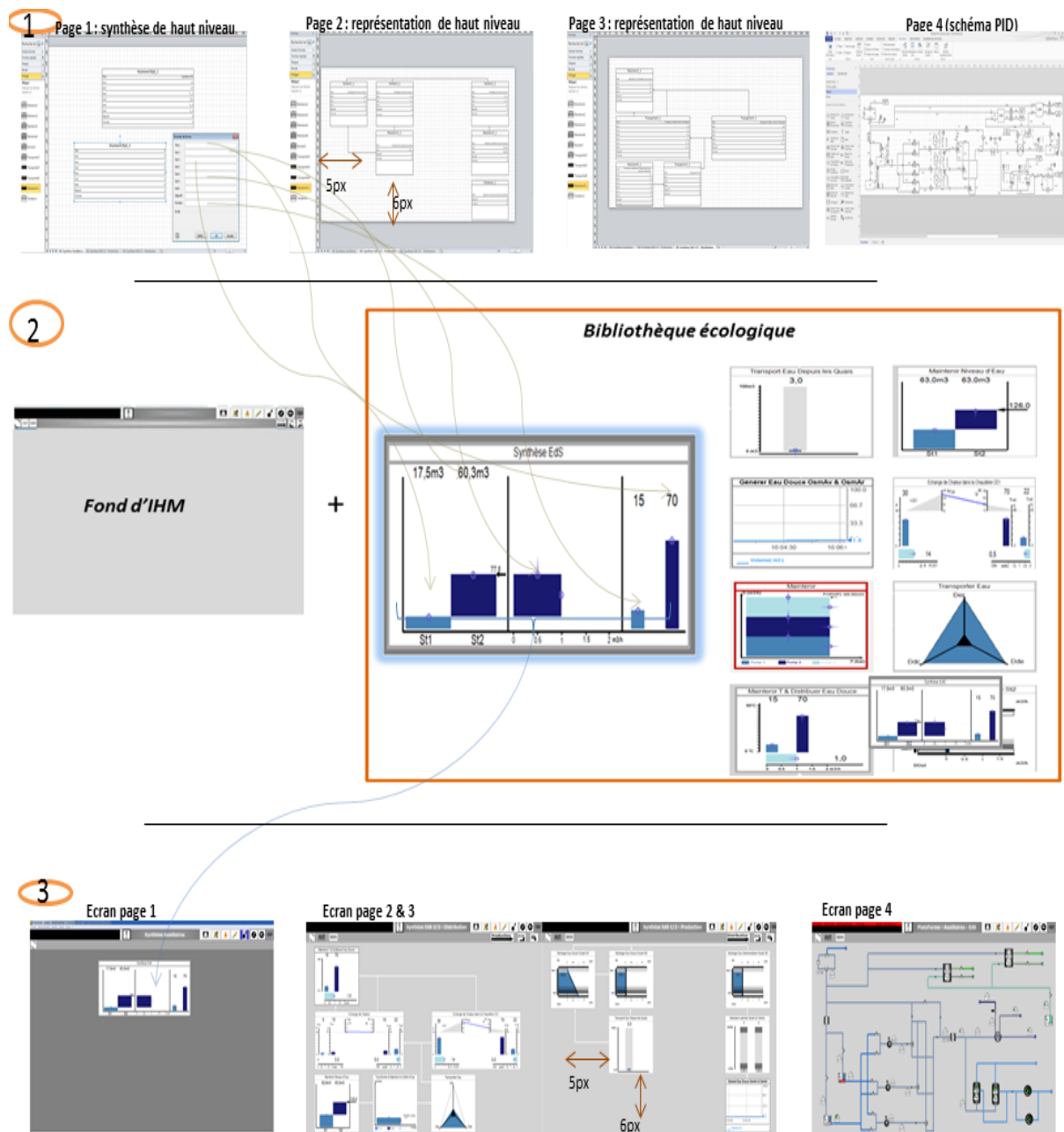


Figure 73 : Implémentation du flot de conception Anaxagore pour le système EDS

4.1. Complétion des schémas d'entrées

L'on retrouve les différents éléments cités préalablement à savoir les schémas en entrée, le modèle standard ou fond d'IHM, les éléments de la bibliothèque. Le système d'eau douce sanitaire a nécessité la complétion de 4 schémas en entrées (2 de haut niveau, un de bas niveau). Pour la synthèse de haut niveau, l'analyse a fait émerger trois processus principaux (additionner, transformer et maintenir). Ces trois processus liés renvoient aux widgets « synthèse de haut niveau ». Ce widget a donc été utilisé et complété sur la base des informations remplies par le concepteur puis générer sur la page synthèse de haut niveau.

La Figure 74 représente la boîte de dialogue générique que remplit un concepteur sur la base de l'analyse de domaine de travail réalisée pour le système d'eau douce sanitaire (voir chapitre 2). Cette fenêtre est générique au processus choisi par l'opérateur. Dans notre exemple ce processus est le processus « stockage ».

Figure 74 : Boîte de dialogue schéma de haut niveau

Pour l'élément stockage le concepteur remplira le titre (2) de l'élément correspondant au nom du processus, à savoir de stockage. Pour les variables (3, 4, 5) l'opérateur indique le nom des variables en fonction des capteurs présents sur le circuit, cette partie nécessite une co-conception avec un expert des informations disponibles sur le système. Appliqué au système d'eau douce, le concepteur indique pour la variable 1 = Din variable 2= Dout et variable 3=V1. Dans l'onglet objectif (6), le concepteur indiquera les objectifs généraux associés à ce processus par exemple ici stocker de l'eau douce déminéralisée. Enfin au niveau du champ formule (7), l'onglet est pré rempli, car pour ce processus, nous n'avons associé qu'un seul type de formule mathématique et par conséquent un seul type de représentation graphique. Cette onglet sera donc pré rempli et grisé, pour indiquer qu'il n'y a pas d'autre type de formule possible, avec la formule $V \text{ de/dt} = \text{Din-Dout}$.

4.2. Association des éléments de la bibliothèque, du fond d'IHM avec les informations en entrées

Chacun des éléments remplis préalablement va ensuite être associé à un élément de la bibliothèque graphique en l'occurrence pour le processus générer se sera le widget 5 « stockage ». La Figure 75 représente l'association de chacune des données au parti complétable du widget. À l'exception du champ concernant la formule qui détermine le widget, tous les champs servent à renseigner sur les données nécessaires à l'animation de l'élément.

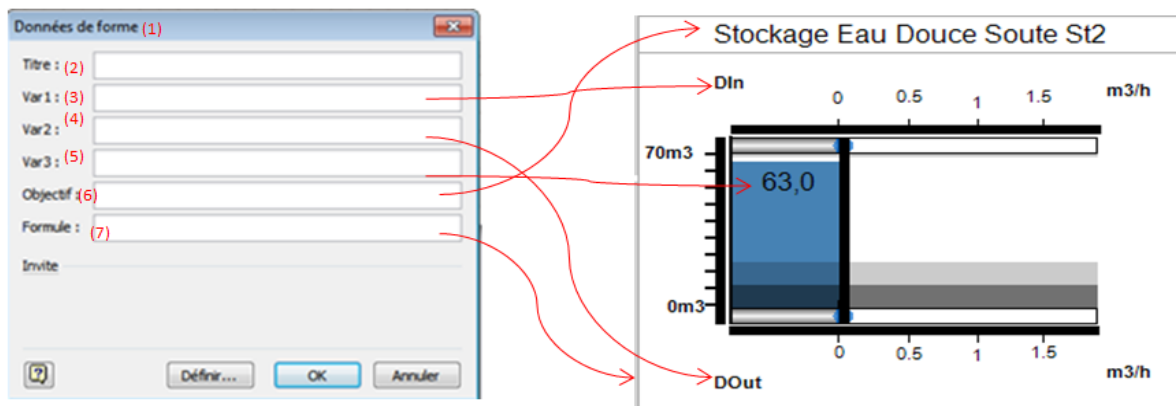


Figure 75 : Liens boîte de dialogue-données sur le widget stockage

4.3. Génération des IHM

La dernière étape va permettre d'afficher le widget écologique complété sur l'interface (Figure 73). Le positionnement du widget au moment du remplissage sur le schéma de haut niveau sera conservé. On retrouvera ainsi à la même place le widget stockage.

5. Limites et perspectives de la génération automatique par Anaxagore

5.1. Limites

Bien qu'un grand pas vers une meilleure intégration de l'ergonomie ait été réalisé, cette nouvelle version d'Anaxagore présente cependant plusieurs limites. La première concerne un problème d'intégration de l'information. Burns, (2000) démontre que les interfaces avec une forte proximité spatiale et temporelle sont plus performantes. Un haut niveau de proximité spatiale se définit par le fait qu'un ensemble d'informations se doit d'être le plus proche possible spatialement. Dans le cadre de l'approche écologique les informations reliées par les relations moyens-fin se doivent d'être le plus proche possible à

l'écran. Le niveau d'intégration spatiale correspond au fait que toutes les informations liées par une relation moyens fins doivent apparaître avec la plus grande proximité temporelle possible. L'interface idéale serait une interface affichant sur le même espace et en même temps l'ensemble des informations sur le domaine de travail.

Or si l'on se réfère à l'expérimentation de Burns notre interface actuelle présente un faible niveau d'intégration temporel et un faible niveau d'intégration spatiale. L'information relative à un niveau étant affichée spatialement sur des pages différentes et par conséquent non simultanément temporellement. Au vu de la littérature (Burns, 2000b), cette faiblesse d'intégration peut avoir des conséquences sur les performances comme pour le temps de détection d'une faute ou encore la précision du diagnostic.

La seconde limite concerne l'intégration du principe de manipulation directe qui à l'heure actuelle reste très limitée sur les prototypes d'interfaces générées. Les contraintes technologiques liées à la génération automatique ne permettent pas de telles actions sur les widgets à l'heure actuelle. En effet, ce type d'interaction est primordial pour une interface écologique, car elle favorise l'impression pour l'utilisateur d'être directement impliqué dans le contrôle de l'objet.

Au vu de ces quelques limites, des propositions d'améliorations émergent et seront décrites par la suite.

5.2. Perspectives

À l'instar de Lew, Boring, Ulrich, & al (2014) qui proposent un outil pour concevoir des interfaces de supervision industrielle intégrant quelques éléments de manipulation directe, la possibilité d'offrir de telle commande dans la prochaine version des interfaces générées par Anaxagore, semble primordiale. Cela pourrait se matérialiser par la possibilité de pouvoir directement manipuler sur les widgets écologiques certaines valeurs ou paramètres. Ils seraient alors possible de voir réagir directement le système au grès des manipulations.

Odeh, (2007) a proposé de manière originale pour la première fois l'idée d'une bibliothèque d'éléments écologiques. Dans sa proposition les éléments étaient intégrés directement dans le PID. Quant à elle, Burns, (2000) propose d'utiliser la méthode du cycle de Rankine pour favoriser un fort niveau d'intégration à la fois spatiale et visuelle de l'information. Cette dernière solution semble difficilement implémentable en revanche la proposition de Odeh (2007) semble plus abordable technologiquement.

La Figure 76 illustre une maquette de ce à quoi pourrait ressembler cette interface améliorée. La possibilité est donnée à l'opérateur d'afficher les différents niveaux d'abstractions en utilisant la méthode du visual momentum appelée « Long shot ». La technique utilisée est celle de la vue d'ensemble et du vue en détail. Sur cette version, l'on retrouve toujours les trois écrans, celui de synthèse, celui de haut niveau et celui de bas niveau. L'accent est mis sur l'écran central (de haut niveau) où il n'existe plus qu'une seule page intégrant beaucoup plus d'informations de bas niveau notamment sur les vannes et la

tuyauterie. Ces éléments ont pour but de servir de repères visuels pour l'opérateur. De plus, dans la partie supérieur se retrouve un bandeau permettant d'afficher une miniature du widget de la page synthèse. Si l'opérateur clique sur un des widgets écologiques de la zone principale, il l'affiche également dans ce bandeau. Le widget écologique affiché dans le bandeau fait apparaître simultanément une représentation du schéma de bas niveau correspondant aux éléments physiques impliqués par le widget sélectionné et le nom des éléments impliqué. Cette solution permet à l'opérateur de visualiser pour un niveau d'agrégation assez fin, l'ensemble des niveaux d'abstractions. Les principes de proximité temporelle et spatiale en sont alors améliorés. Les informations sur les objectifs, sur les processus, sur les fonctions abstraites et sur une partie des données sur les fonctions abstraites sont affichées au même temps et de manière très rapprochée dans l'espace.

Néanmoins plusieurs difficultés techniques et graphiques empêchent d'arriver à une telle solution, notamment la taille des informations sur les widgets qui peut très vite devenir problématique, compte tenu de la densité informationnelle des systèmes. Les schémas en entrées devraient également être revus. En effet, Le concepteur doit au moment de la conception intégrer les tuyaux et les vannes entre chacun des widgets écologiques. Enfin une solution devra être trouvée pour la représentation locale du système physique associée à un widget.

Nous présenterons dans un dernier chapitre une série d'évaluations expérimentales des prototypes implémentés par le flot de conception Anaxagore afin de valider la démarche et la qualité des interfaces générées. Trois techniques seront abordées, la vérification expérimentale des performances (temps de détection et précision du diagnostic), la vérification expérimentale des indices de cheminement cognitif et enfin une analyse experte basée sur les critères de Ponsa.

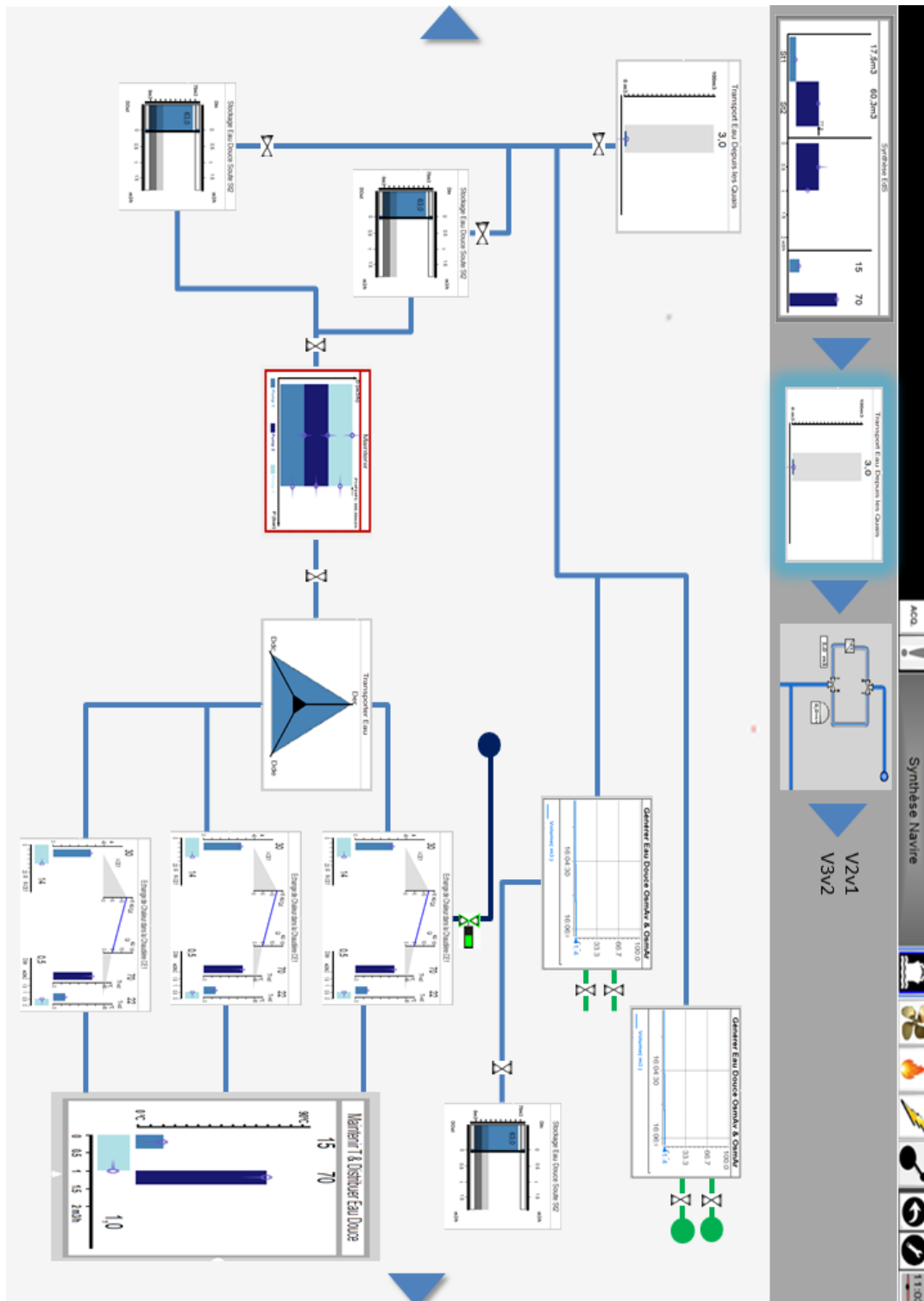


Figure 76 : Interfaces perspectives

Chapitre 4 : Évaluation ergonomique des interfaces générées

En ergonomie plusieurs approches existent pour évaluer une interface. Nous nous proposerons d'en faire un rapide tour d'horizon avant d'aborder l'évaluation ergonomique des interfaces écologiques générées par Anaxagore avant de conclure. Ces différentes approches peuvent être classifiées. L'approche de classification la plus fréquente divise l'évaluation en prédictives et expérimentales (Scapin & Bastien, 1997).

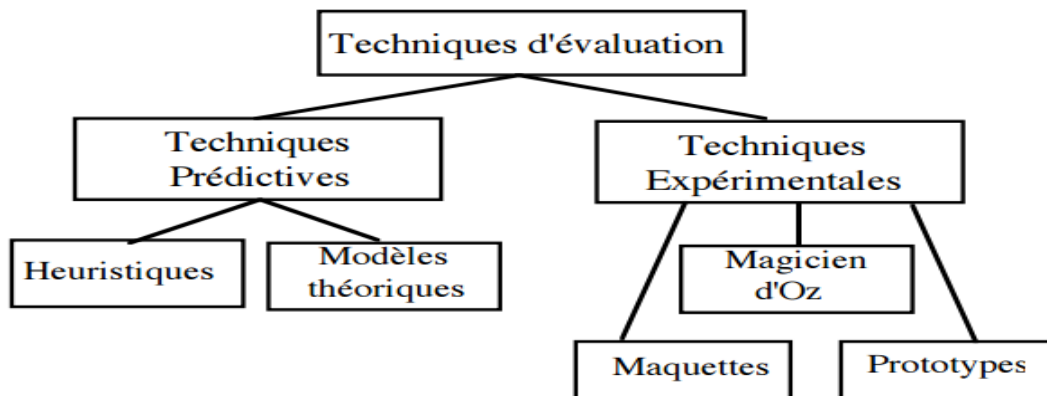


Figure 77 : Classification usuelle des techniques d'évaluation (Balbo, 94)

La Figure 77 illustre la classification et les différentes méthodes utilisables. Les méthodes prédictives ne nécessitent pas la présence des utilisateurs finaux ni l'implémentation de la solution. Ces techniques permettent, à partir d'une description du système, voire de l'utilisateur, d'identifier des problèmes d'utilisabilité. Selon les modèles, théoriques ou heuristiques, les descriptions utilisées sont formelles, semi-formelles ou informelles :

- Les modèles théoriques, tels GOMS (John & Kieras, 1996) ou MAD (Scapin & Bastien, 2001) requièrent une représentation formelle explicite. Ces derniers, en raison de leurs bases théoriques, peuvent également servir d'outils explicatifs applicables à des phénomènes observés sur un système réel.
- Les approches heuristiques telles les "walk-through" s'appuient sur la connaissance d'évaluateurs experts qui, au vu de la description semi-formelle ou informelle du système, détectent des difficultés potentielles. La connaissance mise en jeu peut aller des guides ergonomiques comme Smith et Mosier (Smith & Mosier, 1986) à des ensembles de règles plus ou moins simplifiées comme celles de Bastien et Scapin (Scapin & Bastien, 1997), Nielsen (Nielsen, 1994) ou encore Ponsa (Ponsa & Díaz, 2007).

Les méthodes expérimentales reposent sur le recueil de données comportementales de sujets mis en situation. Le recueil s'effectue par enregistrement des actions ou encore par interviews et questionnaires. Les données observées sont ensuite analysées. L'analyse porte généralement sur les chemins suivis et les procédures adoptées par les utilisateurs, les temps d'exécution, la nature, la cause et la fréquence des incidents, la réussite à un problème. À l'inverse des méthodes prédictives, les approches expérimentales :

- Requièrent la présence d'une population représentative du futur utilisateur du système développé.
- Fournissent des données observées du monde réel, non pas des résultats prédictifs approximatifs.
- Se pratiquent généralement à partir de la phase de conception. Pourtant, comme les méthodes prédictives, les approches expérimentales peuvent être appliquées dès les premières étapes du cycle de vie sous forme par exemple d'enchaînement d'écrans esquissés sur papier ou produites par un générateur d'interfaces de type Anaxagore (Bignon, Rossi, & Berruet, 2013).

Dès l'analyse des besoins, une maquette même rudimentaire peut utilement servir à comprendre le problème, à impliquer et convaincre le client et enfin faciliter le dialogue entre les équipes de conception.

De manière générale, les méthodes prédictives et expérimentales se complètent et peuvent se pratiquer tout au long du processus de développement (Tan, Liu, & Bishu, 2009). La pratique itérative « test-corrections » fournit de nouveaux enseignements dont l'intégration conduit à une nouvelle version du logiciel. Le développement d'Anaxagore constitue en cela un excellent exemple. La conception itérative convient au processus de développement en spirale, mais elle s'inscrit également dans un cycle de vie en V avec des retours en arrière. À l'évaluation itérative, on oppose l'évaluation sommative pratiquée une seule fois en fin de cycle.

Le prototype d'interface écologique généré par le flot de conception Anaxagore a été évalué au vu des différentes méthodes et outils d'évaluation cités précédemment. Tout d'abord nous avons présenté dans le chapitre 2 une évaluation d'une analyse de domaine de travail, au vu d'un modèle théorique utilisant l'approche écologique appelé TMTA. À présent, nous exposons les résultats d'une série d'évaluations expérimentales comparant interface écologique et interface conventionnelle appelée condition PID. Nous évaluerons par deux aspects les interfaces : la performance et la capacité à permettre un cheminement cognitif efficace sur le domaine de travail.

Enfin nous présenterons une évaluation heuristique, réalisés par des experts ergonomes, au vu des critères d'évaluation des interfaces de supervision de Ponsa.

1. Évaluation expérimentale de prototypes générés par Anaxagore

1.1. Définition

Un prototype en ergonomie se définit comme un ensemble d'écrans fonctionnels qui possèdent un ensemble de liens cliquables permettant des interactions. L'évaluation expérimentale en ergonomie basée sur un prototype consiste à évaluer auprès d'une population d'experts, l'efficacité et l'efficacé. L'efficacité est évaluée par la précision de la réponse apportée par l'opérateur. L'efficacé est quant à elle évaluée par la capacité à détecter et comprendre rapidement une anomalie. De manière plus générale, l'efficacé en ergonomie est définie comme la performance qu'établirait un expert au sommet de sa courbe d'apprentissage. Et l'efficacité se définit par la capacité d'une IHM à permettre à son utilisateur de réaliser les objectifs fixés.

Dans la suite de ce chapitre, nous focaliserons notre attention sur la vérification des prototypes d'interfaces écologiques générées par Anaxagore. Il s'agit d'examiner si ces prototypes favorisent une meilleure efficacité et efficacé par rapport à des prototypes d'interfaces de supervision conventionnels générés également par Anaxagore. Puis, dans un second temps nous présenterons une seconde étude, celle du cheminement cognitif chez des sujets experts et chez des sujets novices. L'objectif de cette seconde étude est de mettre en avant les déterminants du cheminement cognitif qui peuvent expliquer l'efficacité d'un opérateur.

1.2. Étude comparative des performances chez des sujets experts

1.2.1. Objectifs et hypothèses

Comme présentées dans l'état de l'art, les interfaces écologiques ont par le passé démontré leur capacité à favoriser la perception directe des informations d'une manière robuste. Elles ont également montré une capacité à permettre aux opérateurs experts de meilleures performances face à des situations complexes et non anticipées par les concepteurs. L'objectif de la dernière partie de ce chapitre est d'évaluer la capacité des prototypes d'interface écologique générés par Anaxagore à soutenir les performances des opérateurs.

1.2.2. Méthode

a) Situation expérimentale

Deux groupes seront comparés, pour le premier une interface écologique générée par Anaxagore a servi de support à la réalisation de 4 scénarios. Pour le second, une interface conventionnelle générée également par Anaxagore a servi de support à la réalisation des 4 mêmes scénarios que pour le premier groupe.

Les hypothèses opérationnelles de cette étude peuvent être résumées comme suit :

- Différence entre les groupes en termes d'efficacité (H1) : pour chaque scénario, une différence d'efficacité est attendue entre les deux groupes. Le groupe doté de l'interface écologique est supposé avoir de meilleures performances en termes d'efficacité.
- Différence entre les groupes en termes d'efficacité (H2) : pour chaque scénario, une différence d'efficacité est attendue entre les deux groupes. Le groupe doté de l'interface écologique est supposé avoir un temps de détection plus court (H2a) et un temps de compréhension plus court (H2b).

Dans le cadre du projet Anaxagore, et comme dans les chapitres précédents, le système testé sera un système d'eau douce sanitaire embarqué à bord d'un navire de type Frégate. Nous étudierons le comportement des opérateurs en situation de supervision face à ce système.

b) Description de la tâche

Les scénarios sont testés dans une salle dédiée aux expérimentations sur le site de l'école nationale supérieure maritime de Nantes (Figure 78). Un poste expérimental est composé d'une unité centrale, de deux écrans de 21 pouces, d'un clavier et d'une souris. L'expérimentateur s'assoit à côté, le sujet est face aux écrans. Au centre de la pièce, derrière une cloison mobile, se trouve un second expérimentateur qui déclenche ou interrompt les scénarios depuis un ordinateur portable. Dans un premier temps, les participants sont formés pendant environ une heure 15 minutes aux systèmes et aux interfaces. Le système leur est présenté dans le détail ; puis il leur est demandé d'expliciter leur connaissance du système sur papier, sous la forme d'un test des connaissances relatives au domaine de travail. Ensuite, une présentation détaillée des interfaces et des graphiques leur est faite. Chaque graphique est animé et expliqué pour qu'ils aient une vision claire du fonctionnement de chaque widget et du synoptique. Enfin, une série de questions leur est posée pour vérifier qu'ils sont capables de retrouver une information spécifique à l'aide des interfaces (Annexe 4).



Figure 78 : Dispositif expérimental

Après la phase d'entraînement, il est demandé aux participants de superviser les interfaces en verbalisant à voix haute l'ensemble de leurs observations ou contrôles. De plus, il leur est explicitement demandé à la moindre anomalie repérée, de la signaler à l'expérimentateur et d'expliquer le plus clairement possible la cause de cette anomalie et qu'elle pourrait être les actions correctives pour la faire disparaître. À la fin de chaque scénario, un entretien semi-directif est réalisé.

Quatre scénarios ont été conçus avec deux enseignants/instructeurs de l'école nationale supérieure maritime de Nantes :

- Scénario 1 (Figure 79)

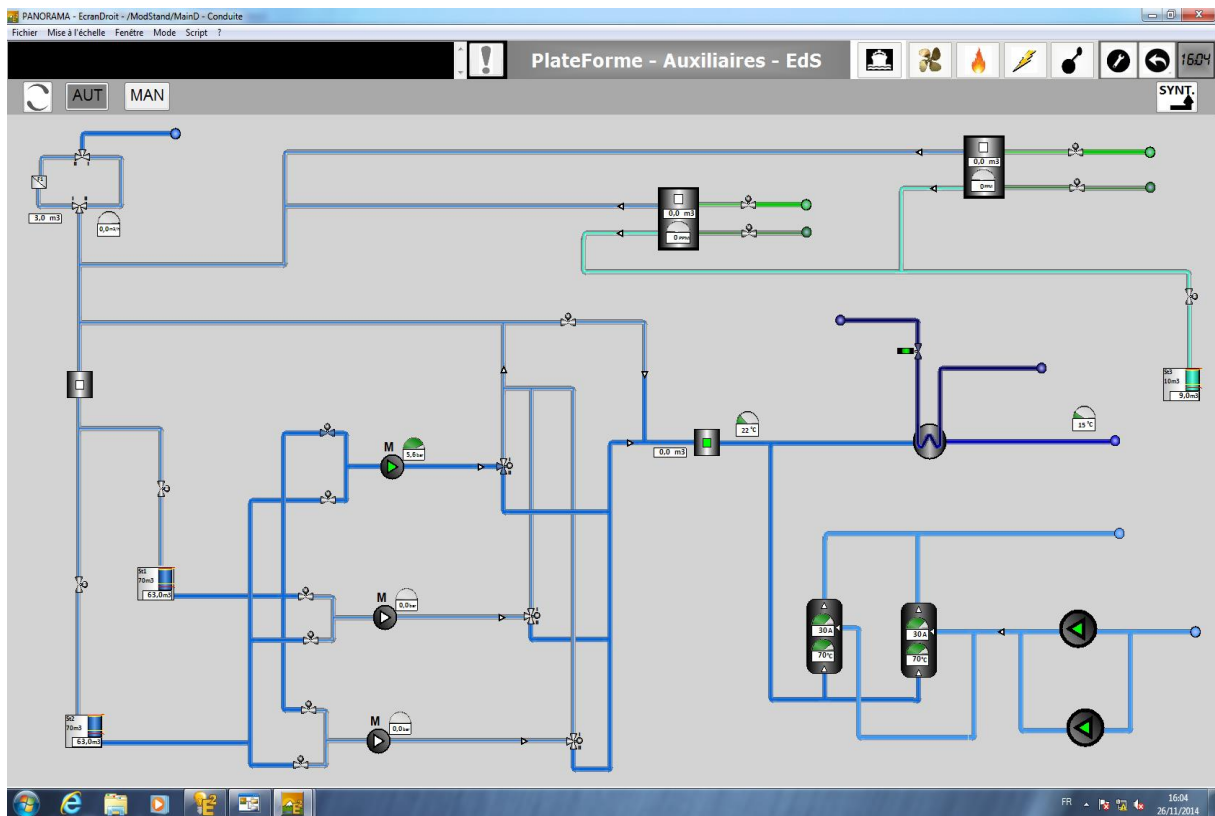


Figure 79 : Scénario 1 en condition conventionnelle

Le scénario 1 présente un débit d'eau en sortie plus important que le débit d'eau en entrée. Les conséquences sont à terme que la soute 1 soit vide et la distribution en manque d'eau potable. La Figure 79 illustre la disposition du circuit et les informations perçues par les opérateurs. L'osmoseur 1 et l'osmoseur 2 sont éteints, il n'y a donc pas de production d'eau potable. Les vannes en aval et en amont de la caisse d'eau numéro 2 sont fermées, néanmoins cette soute est pleine d'eau. La vanne V2VM01 en aval de la caisse d'eau potable numéro 1 est fermée par contre la vanne V2VM03 en amont est ouverte. La pompe H1 est en fonction et assure le débit d'eau dans le circuit. La vanne V3VM01 (voir annexe) est ouverte. Le circuit de refroidissement et les chaudières fonctionnent normalement. Le circuit est donc en distribution via la soute 1 et nécessitera à terme une action de l'opérateur pour éviter qu'elle ne se vide entièrement.

- Scénario 2 (Figure 80 et Figure 81) :

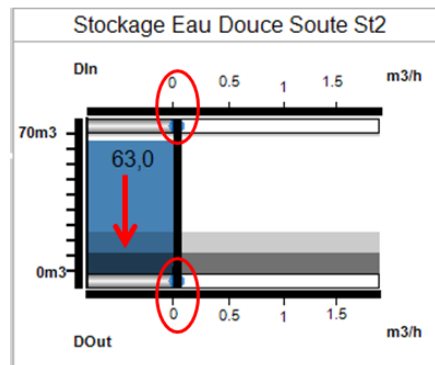


Figure 80 : fuite eau soute 1 scénario 2

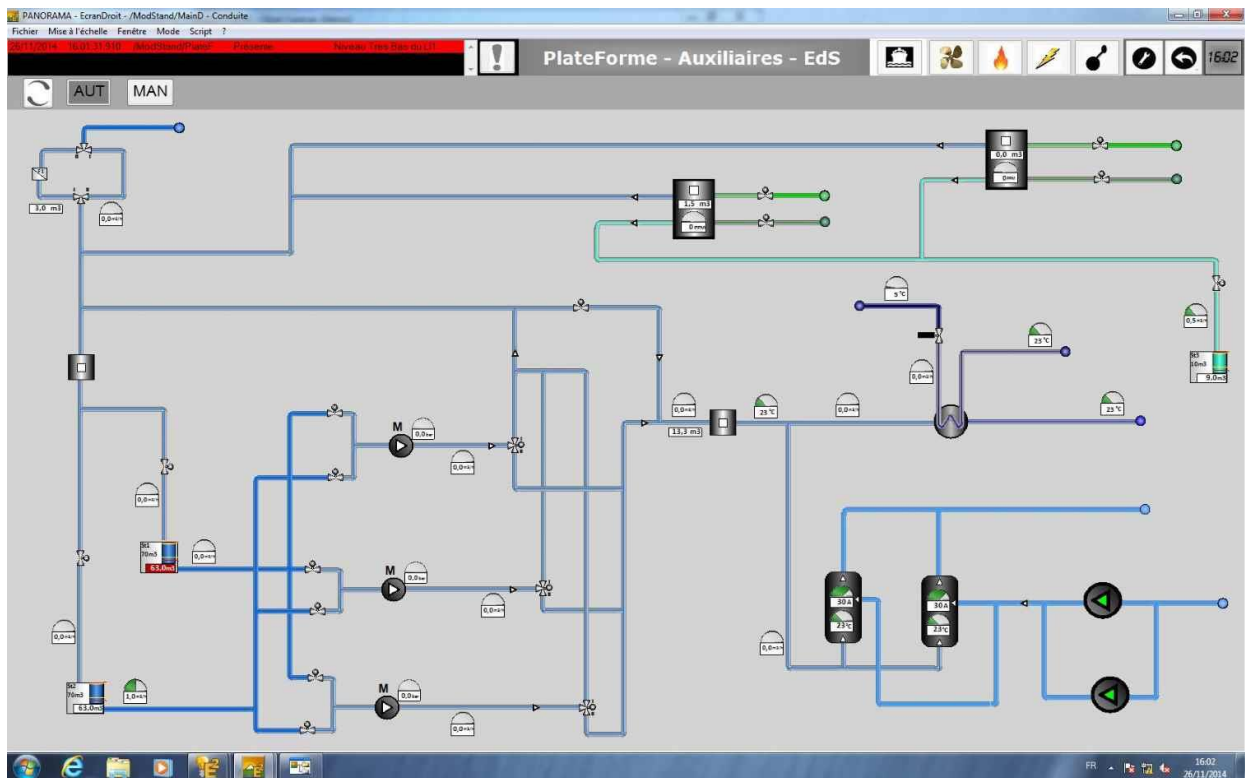


Figure 81 : Scénario 2 en condition conventionnelle

Le scénario 2 présente un problème de fuite dans une soute. Le niveau d'eau de la soute 1 baisse alors qu'il n'y a pas de débit en sortie dans la soute 1. Le circuit est disposé de la manière suivante. Toutes les vannes du circuit sont fermées, les osmoseurs sont à l'arrêt, les pompes sont stoppées et les chaudières ne fonctionnent pas. Les deux caisses sont remplies, mais le niveau de la caisse 1 diminue (Figure 81). L'opérateur doit repérer cette diminution puis émettre des hypothèses quant à l'origine de ce comportement.

- Scénario 3 (Figure 82 et Figure 83)

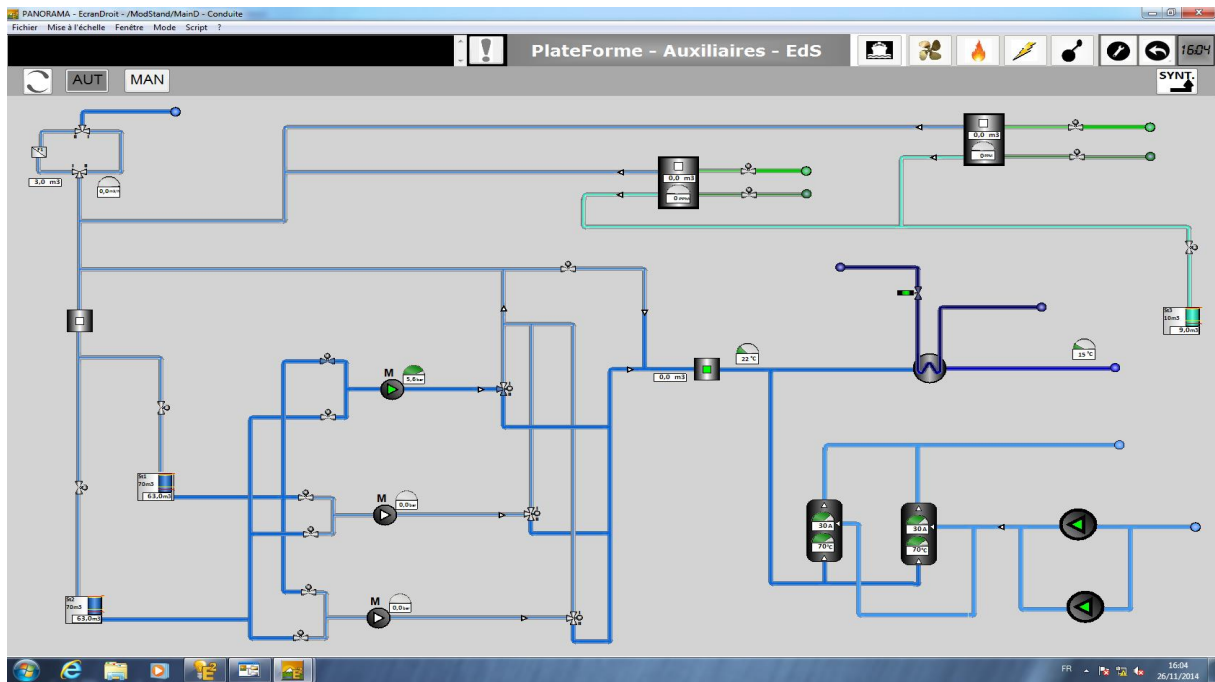


Figure 82 : Scénario 3 en condition écologique écran de bas niveau

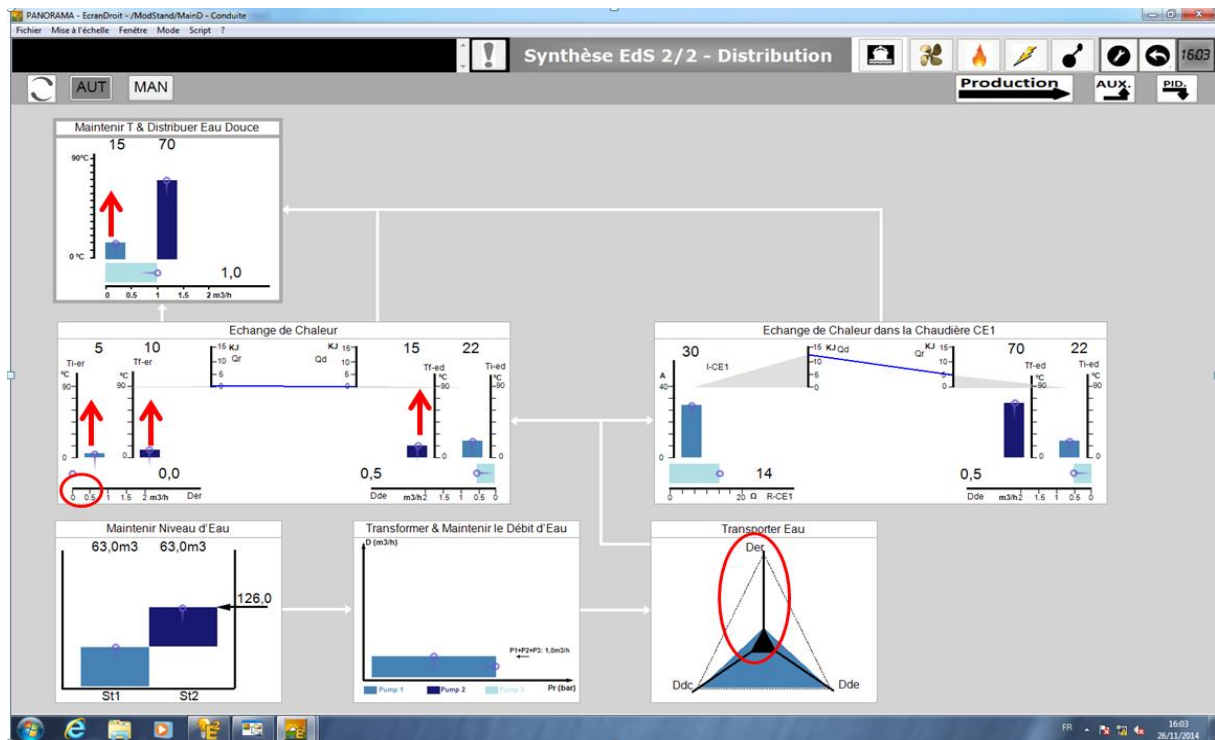


Figure 83 : Scénario 3 en condition écologique écran de haut niveau

Le scénario 3 présente comme principale anomalie, un problème de réfrigération de l'eau. Le capteur d'information indique que la vanne V2VR01 permettant l'alimentation de l'échangeur thermique entre l'eau réfrigérée et de l'eau potable à température ambiante, est ouverte alors qu'elle est en réalité fermée. De plus, à terme, le scénario 3 amènera à un écoulement complet de l'eau dans la soute 1 et rejoindra en cela le scénario 1 sur le risque

de se retrouver sans eau dans la soute 1. Le circuit est disposé de manière identique au premier scénario.

- Scénario 4 (Figure 84 et Figure 85)

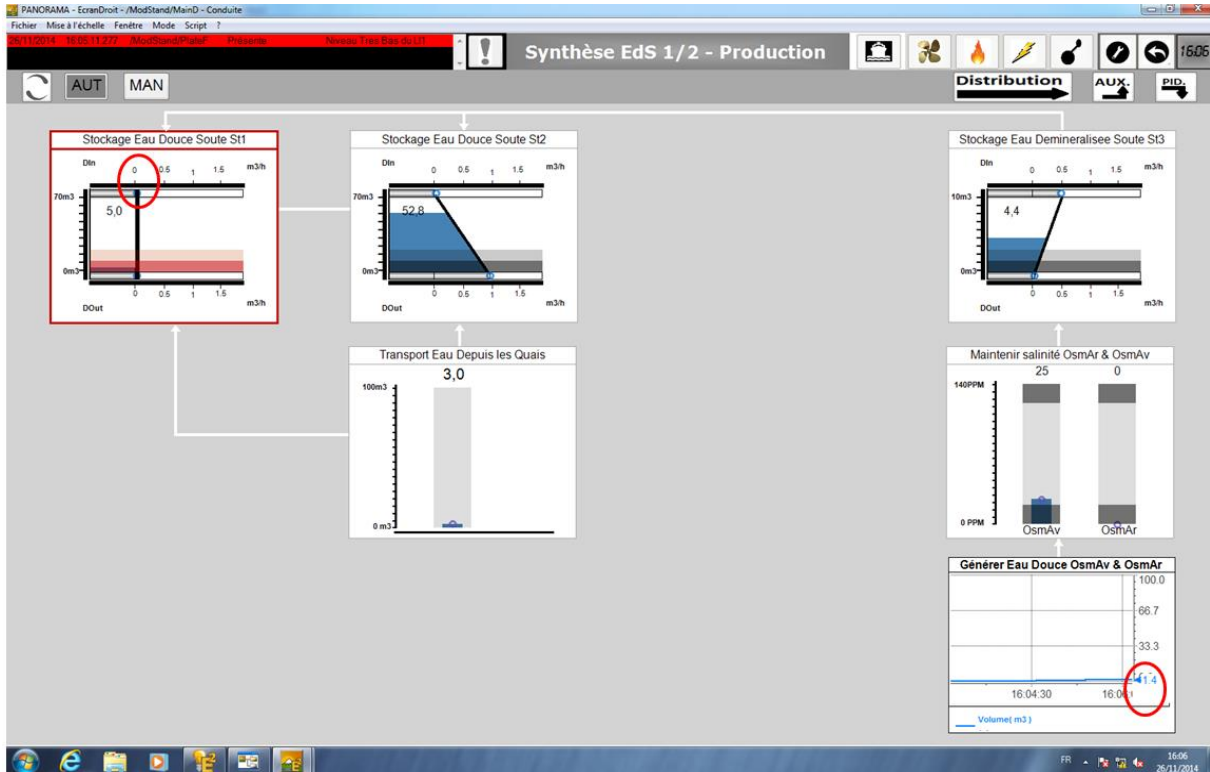


Figure 84 : Scénario 4 en condition écologique écran de haut niveau

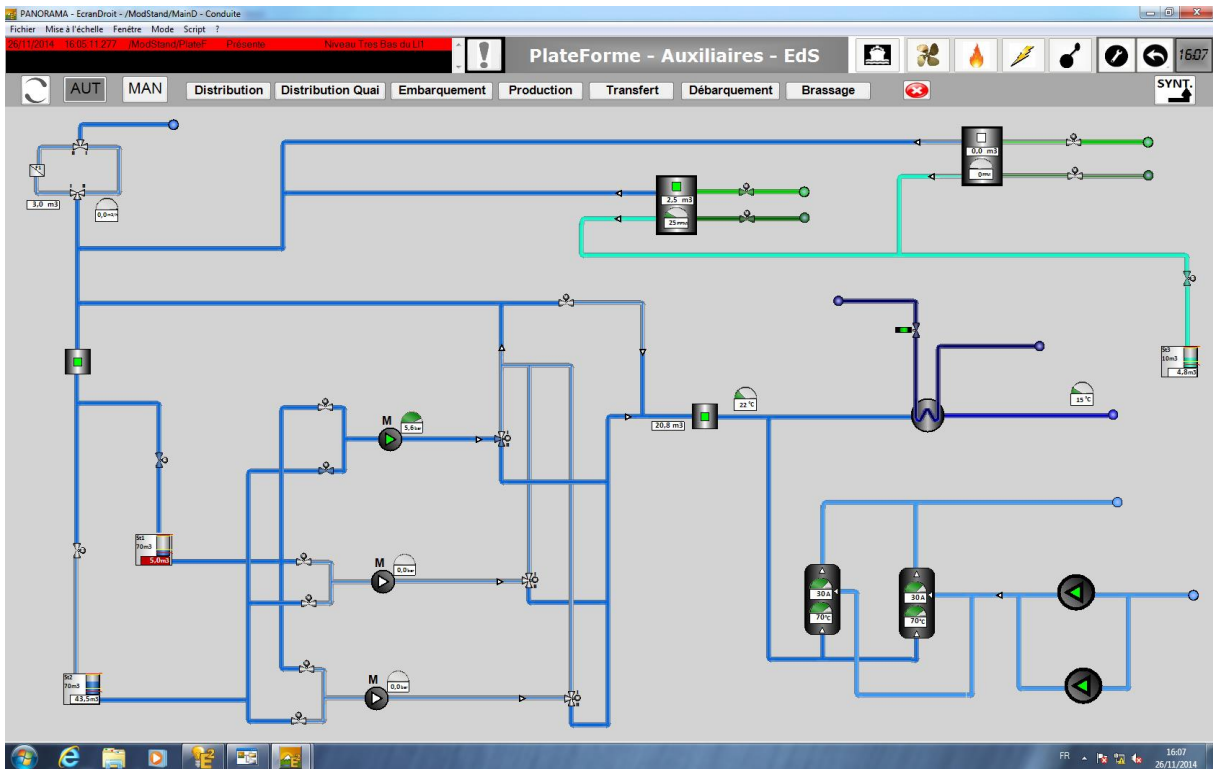


Figure 85 : Scénario 4 en condition écologique écran de bas niveau

Le scénario 4 présente un problème d'alimentation de la caisse 1 qui devrait être alimenté par l'osmoseur 2, mais qui dans la réalité ne se remplit pas. La vanne indiquant qu'elle est ouverte alors que dans la réalité la vanne est bloquée en position fermée. Le circuit est disposé de la manière suivante. L'osmoseur 1 est éteint, l'osmoseur 2 est en route, il alimente la caisse 3 en eau déminéralisée, la vanne V2VM09 est ouverte. La vanne V2VM01 apparaît comme ouverte ce qui laisse supposer que la caisse 1 est alimentée. La vanne V2VM02 est fermée. La caisse 2 n'est donc pas alimentée. Les vannes V2VM03, V2VM05 et V2VM08 sont fermées, la caisse 1 n'alimente donc pas la distribution. La vanne V2VM04 est ouverte, le circuit est donc disposé de manière à ce que la distribution se fasse via la caisse 2. Enfin, les chaudières et le système d'échangeur sont en état de marche fonctionnelle et la vanne V2VR01 est ouverte, l'eau réfrigérée est donc correctement acheminée.

c) Variables dépendantes

- **Mesure de l'efficacité**

Pour chaque scénario, la mesure de la performance est évaluée par un score de réussite utilisant une échelle allant de 0 à 2. La précision du diagnostic est basée sur l'échelle de score proposée par Pawlack et Vicente (Pawlak & Vicente, 1996).

- 0 point : l'opérateur ne dit rien de pertinent par rapport à l'anomalie
- 1 point : l'opérateur fournit une vague, mais correcte description des effets du problème
- 2 points : l'opérateur fournit un état correct des impacts fonctionnels spécifiques et une explication de l'anomalie

Pour chaque scénario, le score de chaque participant est attribué de manière collégiale par deux évaluateurs experts sur le problème.

- **Mesure de l'efficience**

Pour chaque scénario, l'efficience est mesurée par une mesure du temps nécessaire à l'opérateur pour détecter le problème. Puis une mesure du temps de compréhension du problème est effectuée. Cette mesure correspond au temps nécessaire à l'opérateur pour comprendre l'origine du problème à partir du moment où l'opérateur a détecté l'anomalie.

d) Matériels et participants

L'interface écologique et l'interface conventionnelle sont générées toutes les deux à partir du flot de conception Anaxagore. Pour l'interface écologique, une analyse du domaine de travail a été réalisée ce qui a permis de compléter les deux schémas en entrée nécessaire à la génération de l'interface écologique. De même pour l'interface conventionnelle, le schéma structuro-fonctionnel a été réalisé par un ingénieur puis généré selon le flot de conception Anaxagore en un prototype d'interface (Figure 86 et Figure 87).

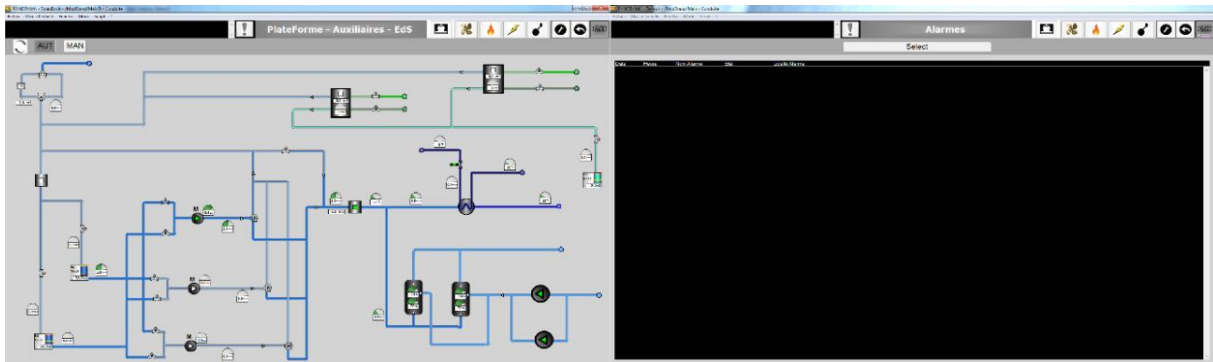


Figure 86 : Interface traditionnelle

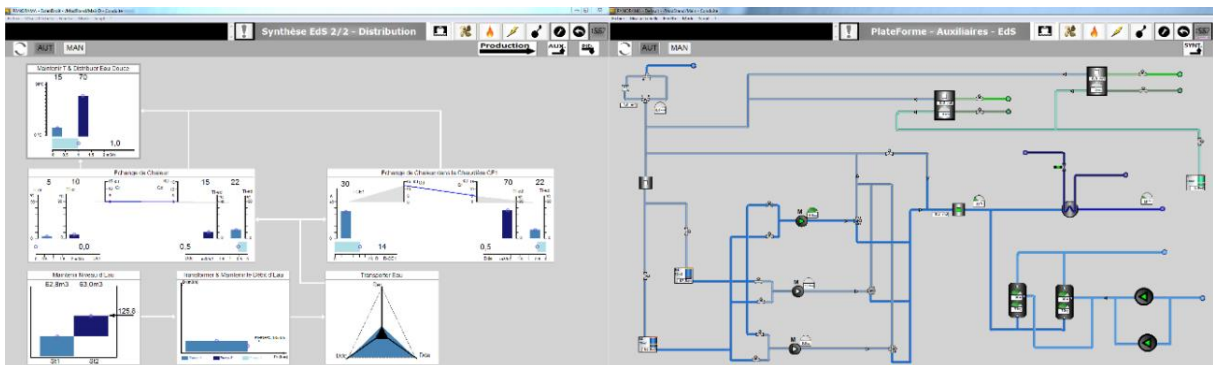


Figure 87 : Interface écologique

Tableau 17 : Caractéristiques des sujets

Sujet	Sexe	Age	Année d'expertise
1	Femme	27	5
2	Homme	26	5
3	femme	24	5
4	Homme	29	6
5	Homme	27	5
6	Homme	30	8
7	Homme	28	6
8	Homme	26	5
9	Homme	24	5
10	Homme	24	5
11	Homme	25	5
12	Homme	24	5
13	Homme	23	5
14	Homme	28	5

14 officiers navals ont participé. La population se compose de 12 hommes et 2 femmes. Ils ont tous suivi une formation mixte à l'école nationale supérieure maritime de Nantes leur permettant d'intervenir en tant qu'officier sur la passerelle ou en tant

qu'officier-chef de machine. Ils sont tous en dernière année de cette formation et ont tous déjà navigué plus de 12 mois en mer pour de grandes compagnies tels Brittany Ferry ou la SNSM (Tableau 17).

L'étude s'est déroulée sur une dizaine de jours dans les locaux de l'ENSM à Nantes.

e) Déroulement de la passation

Dans un premier temps les sujets sont entraînés (Figure 88). Puis, les consignes sont données à l'opérateur. Le scénario démarre et se poursuit jusqu'à ce que l'opérateur trouve l'anomalie liée aux scénarios et l'explique. À la fin de chaque scénario, le sujet passe un entretien semi-directif composé d'une dizaine de questions (annexe 3). Une fois les 4 scénarios effectués, un entretien final est réalisé. Lors de cet entretien, le sujet se trouve confronté à l'autre condition expérimentale et des questions ouvertes lui sont adressées.

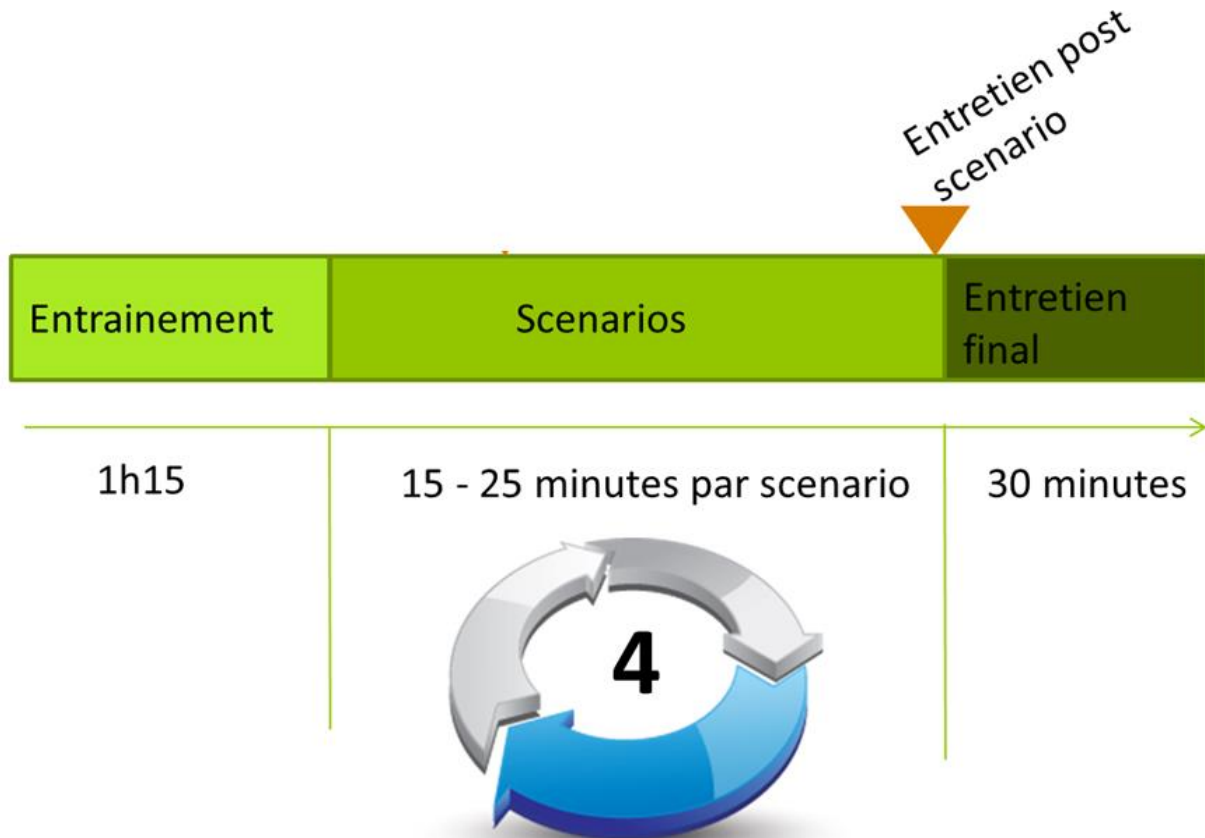


Figure 88 : Déroulement de la passation

f) Traitement des données

Dans un premier temps, nous avons fait un test Kolmogorov-Smirnov, les résultats de ce test ont montré que les données respectées une loi normale pour l'ensemble des résultats. Nous avons donc fait le choix d'utiliser un test paramétrique :

- Test t de Student afin d'analyser la variabilité interindividuelle entre les deux groupes (échantillons non appariés) pour chaque scénario.

Les données sont analysées avec le logiciel Excel 2013 équipé du logiciel additionnel XLSTAT 2012.6.03.

1.2.3. Résultats

a. Précision du diagnostic

La Figure 89 montre que les sujets en condition EID étaient plus efficaces dans les scénarios 1 (moyenne= 1.71 et 1.42 ; écart type=0.75 et 0.78; $p<0.05$), 2 (moyenne= 1.71 et 1.28 ; écart type=0.75 et 0.95; $p<0.05$), 3 (moyenne= 1.57 et 1.42 ; écart type=0.53 et 0.78 ; $p<0.05$). Ces résultats vont dans le sens de l'hypothèse H1. Néanmoins, les résultats pour le scénario 4 montrent que pour ce scénario les interfaces conventionnelles basées sur le P&ID permettent une plus grande efficacité pour diagnostiquer le problème. Ce résultat invalide l'hypothèse H1 pour le scénario 4 (moyenne= 1.14 et 1.42 ; écart type= 0.89 et 0.97 ; $p<0.05$).

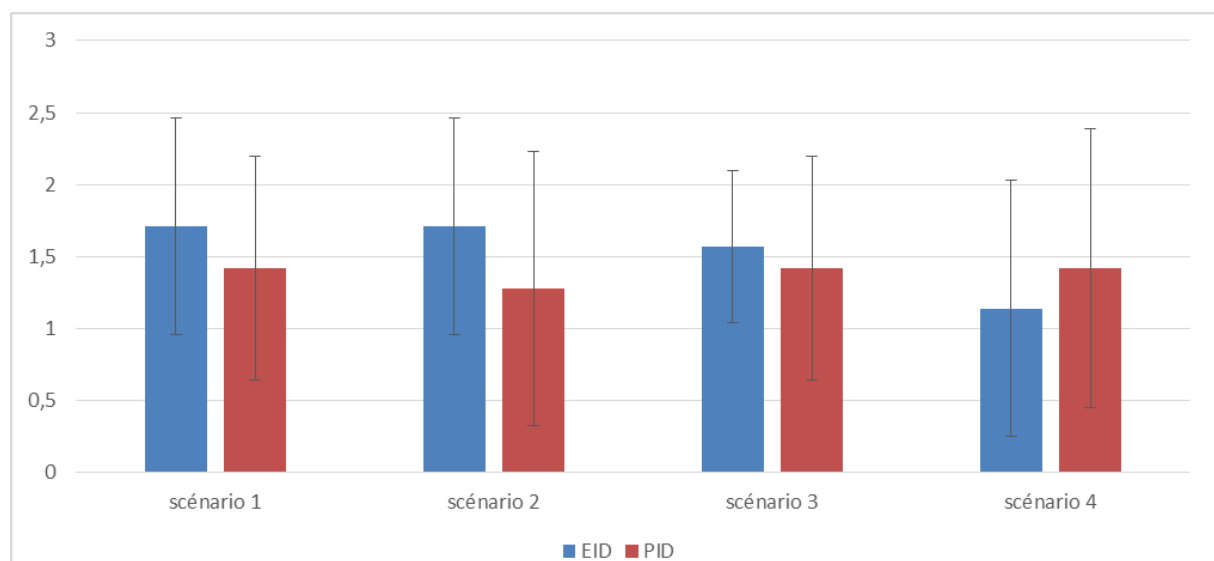


Figure 89 : Score moyen pour chaque scénario

b. Temps de détection de l'anomalie

La Figure 90 montre que les sujets en condition EID détectaient significativement plus rapidement les anomalies dans les scénarios 1 (moyenne = 85secondes et 202 secondes; écart type=45 et 128 ; $p<0.05$) et 3 (moyenne = 117 secondes et 192 secondes; écart type =116 et 147; $p<0.10$). Ce résultat valide l'hypothèse H2a pour les scénarios 1 et 3. Par contre, la différence n'est pas significative pour les scénarios 2 et 4. Les opérateurs ont tendance, sans que cela soit significatif à détecter le problème plus rapidement en condition PID dans le scénario 2. Pour les scénarios 2 et 4, les résultats ne permettent donc pas de valider l'hypothèse H2a.

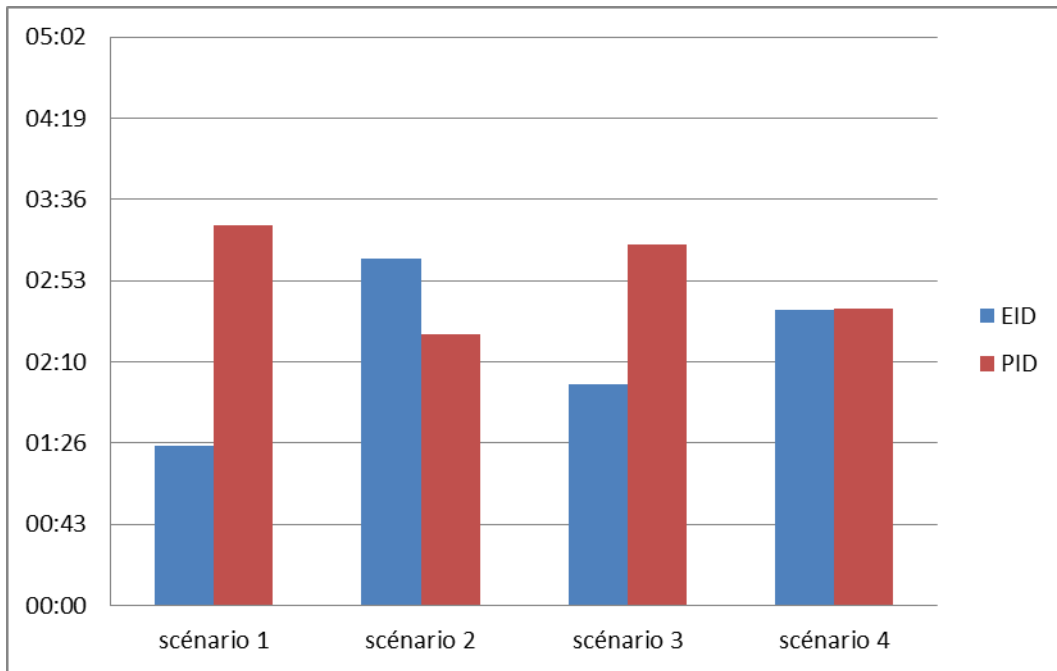


Figure 90 : Temps de détection moyen pour chaque scénario

c. Temps de compréhension du problème

La Figure 91 montre une tendance à des temps de compréhension plus longs en condition EID pour les scénarios 1, 2, 3. Les différences entre les deux conditions au niveau des temps de compréhension ne sont pas significativement différentes pour le scénario 1 et 4. On constate une différence significative à comprendre plus rapidement le problème avec les interfaces conventionnelles dans le scénario 3 (moyenne= 72 et 35 secondes ; écart type= 62 et 50 secondes ; $p < 0.05$) et dans le scénario 2 (moyenne=53 et 27 secondes ; écart type= 14 et 35 secondes ; $p < 0.10$). Au vu des résultats l'hypothèse H2b n'est donc pas validée.

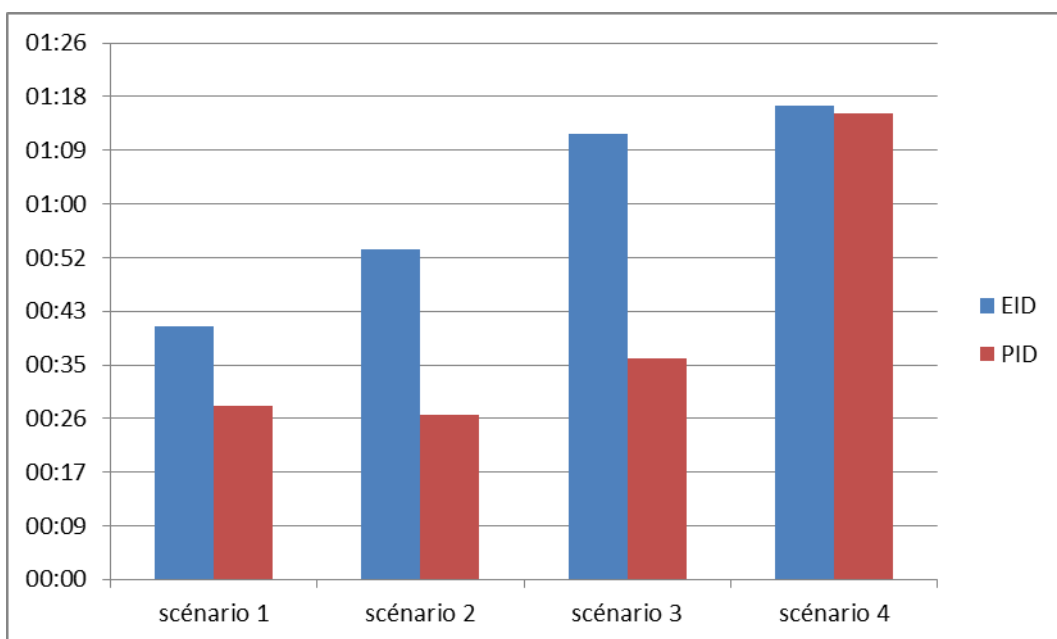


Figure 91 : Temps de compréhension

1.3. Discussion : Interfaces écologiques versus conventionnelles

De manière globale les prototypes d'interfaces écologiques générées semblent présenter une bonne ergonomie en permettant une bonne efficacité et efficacité dans la majorité des scénarios (3 scénarios sur 4). Le score moyen d'efficacité en condition écologique (moyenne : 1,53) est meilleur qu'en condition conventionnelle (moyenne : 1,46). Pour la majorité des scénarios, l'hypothèse 1 est donc validée. Les résultats des scores d'efficacité qui correspondaient à la rapidité à détecter et comprendre le problème par les opérateurs sont plus nuancés. En effet, bien que pour les scénarios 1 et 3, on observe une détection significativement plus rapide, pour le scénario 2 la tendance est inverse bien que non significative et pour le scénario 4 aucune tendance ne se dégage. L'hypothèse 2a est donc validée pour la moitié des scénarios (1 et 3).

Pour l'hypothèse concernant la différence d'efficacité et l'hypothèse sur le temps de détection plus court en condition écologique, nous constatons que pour le scénario 4, les résultats sont soit en faveur des interfaces conventionnelles, soit non significatifs. Une analyse du scénario, des verbalisations, et des entretiens post scénario permet de fournir de premières pistes explicatives à ces résultats. En effet, la précision du diagnostic pour le scénario 4 oblige en premier lieu l'opérateur à comprendre comment est disposé le circuit puis à détecter une anomalie entre les informations de haut niveau et la disposition physique du circuit. L'élément central dans la résolution de ce problème est donc la disposition physique du circuit. Les interfaces conventionnelles favorisent la perception des informations basées sur les fonctions et formes physiques. Elle serait donc plus favorable au scénario 4 qui fait tout particulièrement appel à ce type d'information. Ce résultat pourrait également expliquer un temps de détection du problème non significatif entre les deux conditions, le problème étant détecté par les représentations de bas niveau présentes dans les deux conditions. Une seconde hypothèse explicative repose sur une méconnaissance de l'ensemble des widgets du fait d'un temps d'entraînement trop faible pour une exploitation optimale de toutes les représentations écologiques. En effet, le constat qu'il y avait une production d'eau sur le widget « production d'eau » (Figure 92) associé à dans un second temps à l'observation de l'absence de débit entrant sur la représentation écologique du « stockage d'eau dans la soute 1 » aurait pu permettre aux opérateurs de détecter et comprendre le problème avec les interfaces écologiques. Enfin, les verbalisations montrent que les opérateurs n'évoquent quasiment jamais les widgets sur la génération d'eau par les osmoseurs et se basent quasi systématiquement sur le schéma physique pour voir si une génération d'eau était en cours par les osmoseurs. Il leur faut donc, en l'absence des informations apportées par le widget, orienter leur diagnostic sur l'intégration des informations de bas niveau et les informations de haut niveau. Cette intégration est rendue difficile par une faible intégration spatiale de l'information. Également, le widget de production d'eau n'est jamais utilisé dans les autres scénarios. Cela renforce l'hypothèse que

le manque d'entraînement et de connaissance de certains widgets ait pu impacter sur des scénarios comme le scénario 4.

L'hypothèse 2a n'est pas vérifiée non plus dans le scénario 2, malgré le fait que les performances des opérateurs en condition écologique semblent meilleures sur ce scénario. La principale hypothèse explicative est liée encore une fois aux caractéristiques de l'anomalie et aux caractéristiques du widget écologique. En effet, dans le scénario 2 l'anomalie est une fuite d'eau. Cette fuite se caractérise par une baisse extrêmement lente du niveau de la caisse d'eau numéro un. Graphiquement sur les interfaces conventionnelles cela se traduit par une diminution de la valeur numérique affichée sur le pictogramme de la soute 1. Sur les interfaces écologiques, cela se traduit par une diminution de la valeur numérique affichée sur le widget écologique associée à une baisse de la hauteur du rectangle bleu symbolisant le niveau d'eau dans la soute (Figure 92). Cette diminution est appuyée pendant quelques secondes par la présence de « la trace de tendance ». Malgré tout, la fuite implique une diminution très lente graphiquement de l'ordre de 0.1 m³ toutes les 15 secondes. Cette diminution très lente est par conséquent graphiquement très difficile à percevoir. Nous supposons donc que le principal élément ayant permis la détection du problème est l'affichage analogique présent à la fois sur le widget écologique et sur le pictogramme de la caisse, ce qui expliquerait alors l'absence de différences significatives.

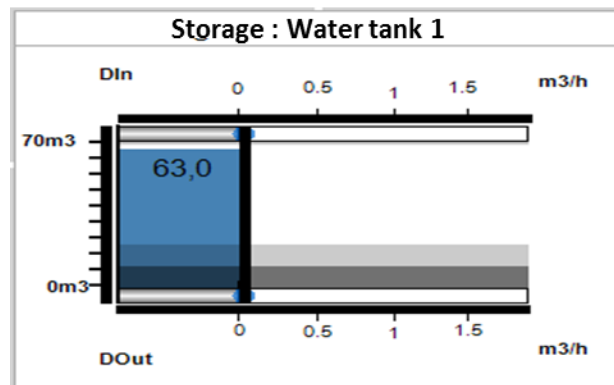


Figure 92 : Widget écologique stockage soute 1

Concernant le deuxième volet de mesure de l'efficacité, les résultats montrent qu'en moyenne que le temps de compréhension est plus long en condition écologique et ce pour l'ensemble des scénarios (significatif pour les scénarios 2 et 3). L'hypothèse 2b n'est donc pas vérifiée. Une première explication envisageable est que les interfaces écologiques privilégient la robustesse à l'efficacité (Borst et al., 2014). Ainsi les interfaces écologiques favorisent la résolution du problème, sans contraindre l'utilisateur à un choix basé sur un modèle optimal de résolution de la tâche. Les interfaces écologiques vont favoriser une cartographie des possibles et laisser le choix à l'opérateur de sélectionner son propre chemin dans ce monde des possibles. Ce schéma n'est donc pas nécessairement le plus efficace et peut conduire à un temps de compréhension plus long, mais assurera une correcte résolution du problème. Un autre facteur explicatif à la longueur du temps de compréhension en condition écologique, est le faible niveau d'intégration spatiale. En effet,

Anaxagore génère sur deux écrans distincts les informations liées aux hauts niveaux d'abstraction et liées aux bas niveaux d'abstraction. Le temps d'intégration entre les informations est par conséquent plus faible à cause de ce que Burns qualifie d'une conception d'interface basée sur un « faible niveau d'intégrations spatiales ». Enfin, une dernière hypothèse explicative à ce temps de compréhension allongée, pourrait provenir du fait que les interfaces écologiques exposent à l'utilisateur le niveau des connaissances, ainsi que la structure complète du savoir liée au domaine et par conséquent interrogent plus les participants et les amènent à plus réfléchir sur les tenants et aboutissants qui se produisent sur le système.

1.4. Étude comparative du cheminement cognitif

1.4.1. Objectifs et hypothèses

En 2007, Morineau et Billet (Morineau & Billet, 2007) ont proposé une méthode basée sur des indicateurs cognitifs articulés à un domaine de travail, pour évaluer le raisonnement des opérateurs experts ou débutants. Ces auteurs évaluent le cheminement cognitif des opérateurs. Cette approche se veut écologique dans la manière d'évaluer l'interface. Elle repose sur l'application du principe des cartes cognitives. Une carte cognitive décrit un ensemble de variables sous la forme de nœuds reliés par des arcs de type « causal ». Le cheminement à travers ces concepts s'apparente aux inférences qui amènent à la décision. Une carte cognitive peut être représentée par une matrice avec en ligne les nœuds émetteurs de liens et en colonne les nœuds récepteurs de liens. Appliqué au cheminement cognitif dans la hiérarchie d'abstraction, l'analyste peut à partir d'un scénario de tâche proposé à un opérateur et l'enregistrement de ces verbalisations, puis d'une codification des verbalisations des opérateurs selon les différents niveaux d'abstractions construire une matrice comptabilisant les fréquences de passage d'un niveau de la hiérarchie d'abstraction à un autre (transition inter niveau) ou d'un niveau vers lui-même (transition intra niveau) (Figure 93). À l'instar des cartes cognitives, les niveaux sources d'une transition sont représentés en ligne et les niveaux de destination, en colonne.

En se basant sur cette matrice, les auteurs proposent trois indices cognitifs principaux : la cohérence du cheminement cognitif, la centralité cognitive d'un nœud et enfin la proportion de liens descendants et ascendants.

Le premier indice, la cohérence du cheminement cognitive font référence aux liens parcourus entre deux niveaux adjacents (voir Figure 93). Un nombre trop élevé de liens incohérents avec la hiérarchie d'abstraction peut signifier que la hiérarchie n'est pas correctement conçue pour retranscrire le cheminement cognitif d'un opérateur.

Le second indice, la centralité cognitive correspondent à la somme totale des liens entrant et sortant à un niveau donné. Morineau & Billet, (2007) montrent de manière originale que l'expert centralise majoritairement son cheminement cognitif au niveau des

fonctions généralisées. Ces résultats vont dans le sens que les fonctions généralisées sont le niveau le plus central de la matrice de domaine de travail à l'intermédiaire entre les informations de très haut niveau (objectifs fonctionnels et fonctions abstraites) et les informations de bas niveau (fonction et forme physique). De même, Potter, Elm, Roth, Gualtieri, & Easter, (2002) notent que les fonctions généralisées correspondent à des concepts abstraits élaborés par les opérateurs de façon à être en mesure de synthétiser de manière opérationnelle une multitude de variables à manipuler (fonctions physiques). Le fait pour un opérateur d'avoir une centralité cognitive proche des fonctions généralisées semble être le signe d'un cheminement cognitif performant.

Niv. de destination Niv. source	Niv. 1 Buts généraux	Niv. 2 F. abstraites	Niv. 3 F. généralisées	Niv.4 F. physiques	Totaux « Liens sortants »
Niv. 1 Buts généraux	Transition Intra-niveau	LS (1,2)		Liens non-cohérents	TLS (1)
Niv. 2 F. abstraites		Transition Intra-niveau	Liens descendants et cohérents		
Niv. 3 F. généralisées		Liens ascendants et cohérents	Transition Intra-niveau		
Niv. 4 F. Physiques				Transition Intra-niveau	
Totaux Liens « entrants »					

Abréviations : F : fonction ; LS(1,2) : Nombre de liens sortant du Niveau 1 vers le Niveau 2 ;
 TLS(1) : Nombre total de liens sortants du Niveau 1.

Figure 93 : Matrice de cheminement cognitive

Le troisième indice, la proportion de liens descendants et ascendants permet de faire émerger le niveau d'expertise d'un opérateur. Les sujets experts opèrent principalement une navigation descendante dans la hiérarchie d'abstraction. Un lien descendant est un lien qui part d'un niveau hiérarchiquement plus abstrait pour aller vers un niveau hiérarchique plus concret (voir Figure 93).

Les auteurs ont soumis une interface écologique appliquée au domaine de la finance hospitalière. Ils ont constaté que l'opérateur, un sujet considéré comme expert, avait majoritairement des parcours descendant et cohérent confirmant la capacité des interfaces écologiques à favoriser des parcours cohérents dans la hiérarchie d'abstraction. Néanmoins l'étude ne compare par une interface conventionnelle et une interface écologique, au vu de ces indices cognitifs innovants. De plus, cette étude n'est réalisée que sur un seul sujet et ne cherche pas à comparer les performances des opérateurs au regard de ces indices cognitifs.

Les meilleures performances en termes de diagnostics des interfaces écologiques par rapport aux interfaces conventionnelles semblent donc pouvoir s'exprimer et s'expliquer à travers des critères plus précis, plus sensibles que sont les indices cognitifs. Une plus grande proportion de liens cohérents et descendants favoriseraient les performances en diagnostic.

Nous avons donc recherché à travers les indices cognitifs et cette seconde expérimentation à comprendre quels indices étaient les plus sensibles aux caractères écologiques ou non de l'interface et déterminé l'impact de chaque facteur sur la performance (précision du diagnostic).

Quatre groupes seront comparés, pour les deux premiers une interface écologique générée par Anaxagore a servi de support à un groupe d'expert et à un groupe de novice. Pour les deux autres, une interface conventionnelle générée également par Anaxagore a servi de support à un autre groupe d'expert et un autre de novice. 4 scénarios ont été soumis à l'ensemble des quatre groupes.

Les hypothèses opérationnelles de cette étude peuvent être résumées comme suit :

- Différence entre les groupes en termes de centralité cognitive (H1) : pour chaque scénario, une différence de centralité cognitive est attendue entre les quatre groupes. Le groupe d'experts doté de l'interface écologique est supposé avoir une centralité cognitive le plus souvent au niveau des processus.
- Différence entre les groupes en termes de cheminement descendant dans la HA (H3) : pour chaque scénario, une différence dans la proportion de cheminement descendant est attendue entre les deux groupes. Le groupe d'experts doté de l'interface écologique est supposé avoir une prédominance de cheminement descendant.
- Différence entre les groupes en termes de cohérence du cheminement dans le réseau moyen-fins (H4) : Pour chaque scénario, une différence de la proportion de cheminement cohérent est attendue entre les quatre groupes. Le groupe d'experts doté de l'interface écologique est supposé avoir une prédominance de cheminement cohérent.

1.4.2. Méthode

Dans le cadre du projet Anaxagore, et comme dans les chapitres précédents, le système testé sera un système d'eau douce sanitaire embarqué à bord d'un navire. Nous étudierons le comportement des opérateurs en situation de supervision face à ce système.

a) Description de la tâche

Les résultats collectés proviennent de deux sessions distinctes. Les verbalisations auprès d'experts ont été récoltées pendant la première expérimentation visant à évaluer les performances des opérateurs à l'école navale de Nantes. Le protocole expérimental est donc identique pour les deux groupes d'experts au protocole de la première expérimentation. Pour les deux groupes de novices, les verbalisations ont été récoltées lors d'une campagne expérimentale au sein du lycée maritime d'Etel. Le protocole expérimental est sensiblement équivalent, seul le temps de formation est réduit à 15 minutes.

Après la phase d'entraînement, les mêmes consignes que dans l'expérimentation avec les experts s'appliquent. Il est demandé de superviser les interfaces en verbalisant

l'ensemble de leurs observations ou contrôles. De plus, il leur est explicitement demandé à la moindre anomalie repérée de le signaler à l'expérimentateur et d'expliquer le plus clairement possible la cause de cette anomalie et qu'elle pourrait être les actions correctives pour la faire disparaître.

Les quatre scénarii sont les mêmes pour les experts et les novices, il s'agit des scénarios préalablement construits avec les instructeurs de l'école navale de Nantes.

b) Variables dépendantes

Les informations manipulées par ces opérateurs durant leur activité sont enregistrées et codées en fonction des niveaux auxquels elles font références dans la Hiérarchie d'Abstraction (Figure 94). Pour le codage, deux experts examinent consécutivement le corpus afin de garantir le codage. Une fois ce codage effectué, une matrice comptabilisant les fréquences de passage d'un niveau de la HA à un autre (transition « inter niveau ») ou d'un niveau vers lui-même (transition « intra niveau ») est réalisée. Dans cette matrice, les niveaux « sources » d'une transition sont représentés en ligne et les niveaux de destination de cette transition sont représentés en colonne. Une matrice présentant les fréquences absolues de passage d'un nœud à un autre est ainsi obtenue (Figure 93). Sur la base de cette matrice, trois indicateurs émergent (la centralité cognitive, la cohérence cognitive et la proportion de liens descendants et ascendants). Ces trois indicateurs correspondent aux variables dépendantes.

CHIFFOL	Temp s	Verbalisations	Page	Niveau d'abstraction	Thème
Sc1	0.17	Donc consommation d'eau sur une caisse.	R	Processus	
	1.29	Débit d'eau plombante sur l'alimentation du bord. Pas de production . Donc caisse 2 qui est pleine donc ça nous fait quand même un tampon. Donc moi avant que la caisse 1 se vide je passerais sur la caisse 2. Je lancerais une production aussi.	R	Fonctions abstraites + Fonction physique + Processus	
	2.10	L'objectif c'est de passer sur la deuxième et produire pour la caisse 1 quoi. Je vérifierais combien il consomme aussi. Après j'attendrais d'être en alarme pour la soute 1, pour garder l'autre en secours. La production sur le 1er oui. Si la production se fait mal ou est de mauvaise qualité je peux passer sur la deuxième comme ça. En avoir sous le pied un peu. Et j'irais voir pourquoi il consomme comme ça. C'est bien la trace comme ça mais ça ne reste pas assez longtemps ça clignote trop. Faut chercher... Et les valeurs qui changent ce serait bien qu'elles sautent aux yeux.	R	Processus	Apport des représentations + Difficulté des représentations + Manque d'information.
	AP	Non c'est une situation courante hein. Le système ne prévient pas du coup par contre. Disons que si on est en train de faire autre chose on ne s'en rend pas compte quoi. Ce qui m'a permis de détecter c'est le graphique avec le niveau des deux soutes avec le débit entrant et sortant . Pour améliorer je dirais une mise en valeur de ce qui sort de la caisse. Voir le chiffre qui a évolué. Naturellement je vais regarder sur le synoptique hein. Et là ça manque.			Connaissance du scénario + manque d'information + Apport des représentations + Apport du PID
Sc2	0.10	Donc là on est sur une augmentation	R	Processus	
	1.00	Je ne vois pas trop ce qui change là.	R		
	2.50	On a une diminution sur la caisse 1 . Pourtant y'a pas de distribution . Y'a pas d'action des hydrophores .	R	Processus + Fonction physique	
	3.30	On a une diminution sur la caisse 1 alors qu'on n'a rien donc j'irais voir sur place hein. Ça peut être une fuite sur place par exemple.	R	Processus	
	AP	Ce n'est pas facile car ce n'est pas flagrant C'est une situation que j'ai déjà rencontré mais finalement on s'en rend plutôt compte quand la caisse est vide et que tout est mouillé dedans.			Facilité du scénario + connaissance du scénario.
Sc3	0.10	On voit la pompe en route .	PID	Fonction physique	
	0.50	On a une augmentation de la température là.	PID	Fonction abstraites	
	1.20	On a une consommation d'eau chaude. Y'a de l'eau dans la chaudière, de l'eau dans l'échangeur.	PID	Processus + Fonction physique	
	3.00	C'est bizarre cette eau qui augmente. La réfrigération elle ne réfrigère pas en fait.	PID	Fonctions abstraites	Apport des représentations + difficulté des représentations + manque d'information.

Figure 94 : Exemple de codage

c) Matériels et participants

- ***Sujets experts***

Les interfaces utilisées et la population sont les mêmes que celles dans la première expérience, à savoir 14 sujets experts répartis équitablement entre la condition avec les interfaces écologiques et la condition avec les interfaces conventionnelles.

- ***Sujets novices***

Les interfaces utilisées sont les mêmes que celle employée dans la première expérience.

12 étudiants en terminal du lycée maritime d'Étel ont participé. La population est composée de 12 hommes soit la totalité de l'effectif. Ils ont tous suivi une formation de base au métier de la mer et une formation d'une semaine à l'utilisation d'interface de supervision conventionnelle de salle de machine de navire. Ils ont tous déjà navigué, mais sur une durée inférieure à 3 mois en mer, pour la plupart sur des petits navires de pêches. Ils connaissent donc les interfaces de supervision de salle de machine, mais leur expertise est très faible, nous considérerons donc qu'il s'agit de sujets novices. Cependant pour diverses raisons, 5 sujets ne se sont pas présentés ou n'ont pu être conservés dans l'analyse. Il y a donc eu 3 sujets novices en condition interface conventionnelle et 4 étudiants novices en condition écologique.

d) Déroulement de la passation

- ***Sujets experts***

Le déroulement de la passation est le même que présenté dans l'expérience 1.

- ***Sujets novices***

Le déroulement de la passation est le même que présenté dans l'expérience 1, seul le temps de formation change, il est réduit à 15 minutes.

e) Traitement des données

Nous faisons le choix d'utiliser un test paramétrique :

- Test t de Student, afin d'analyser la variabilité interindividuelle entre les groupes (échantillons non appariés) pour chaque scénario.
- Un calcul de coefficient de corrélation permet de connaître le lien entre plusieurs mesures.

Les données sont analysées avec le logiciel Excel 2013 équipé du logiciel additionnel XLSTAT 2012.6.03.

1.4.3. Résultats

Du fait de la perte expérimentale de 5 sujets novices, nous présentons les résultats des sujets novices à titre informatif. Le groupe interface écologique avec sujet novice est composé de 4 sujets et le groupe interface conventionnelle avec sujet novice est composé de 3 sujets.

a. Centralité cognitive

La Figure 95 montre que les sujets experts en condition EID ont une centralité cognitive plus souvent au niveau processus par rapport à ceux en condition PID (moyenne= 2.91 et 2.85 ; écart type=0.13 et 0.24). La tendance est inverse pour les sujets novices. Néanmoins, aucun des résultats obtenus n'est significatif. L'hypothèse H1 ne peut donc pas être validée.

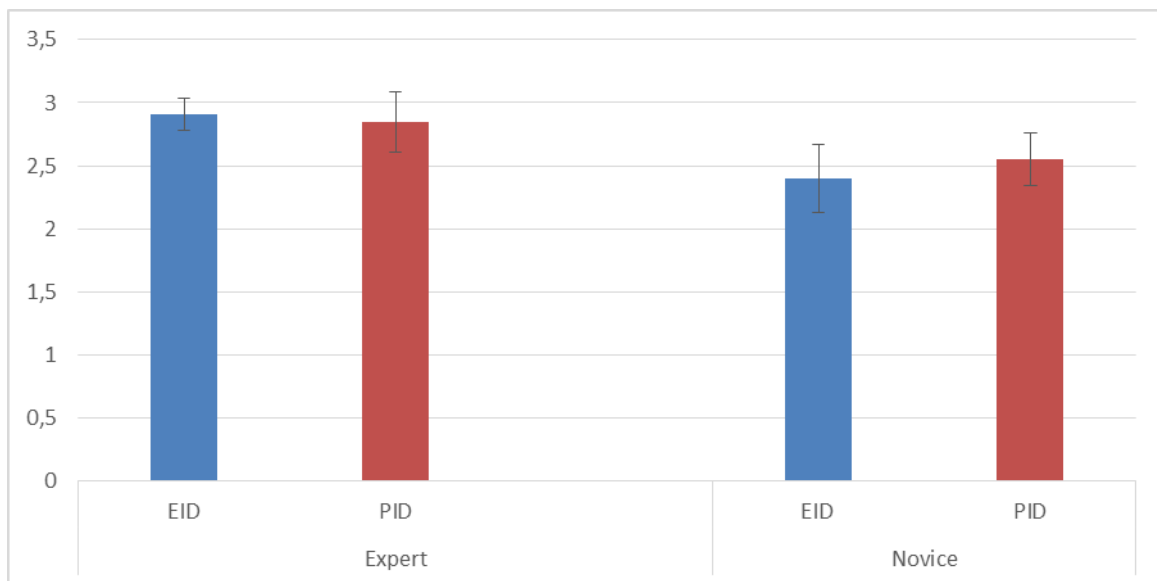


Figure 95 : Résultats centralité cognitive

b. Cohérence du cheminement cognitif

La Figure 96 montre que les sujets experts en condition EID avaient un cheminement cognitif dans la HA significativement plus cohérent (moyenne= 93.68 et 63.63 ; écart type=7.38 et 30.98; $p < 0.05$). À titre informatif, une différence significative similaire émerge pour les sujets novices (moyenne=88.85 et 64.86 ; écart type= 13.05 et 17.41). Ces résultats valident l'hypothèse H3.

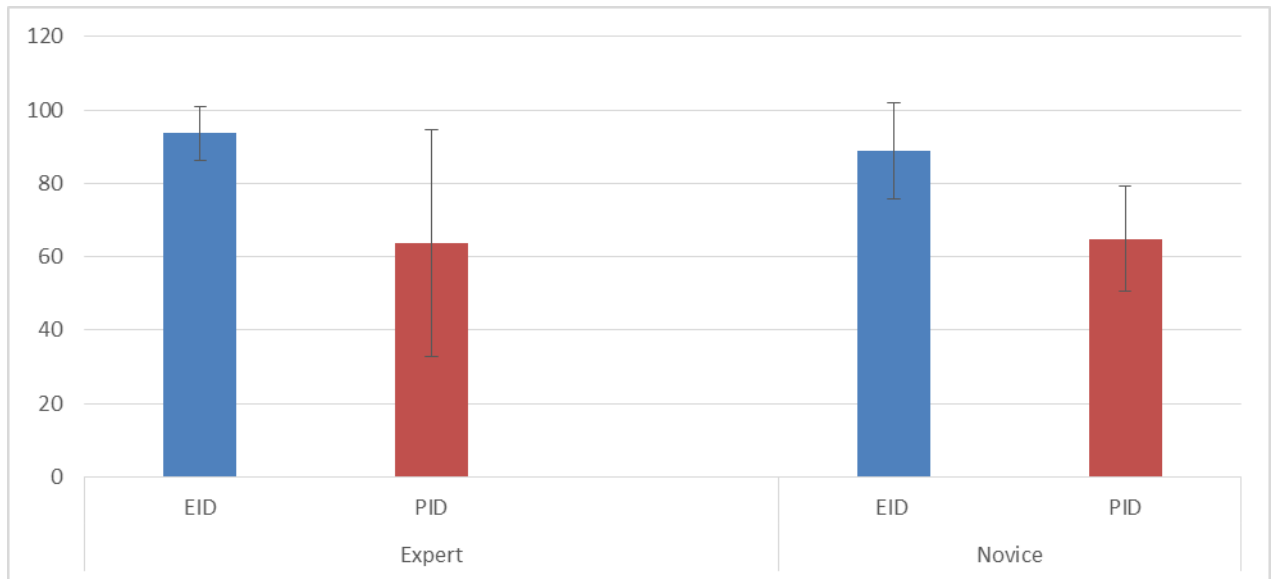


Figure 96 : Proportion de liens cohérents

c. Occurrence de liens descendants

La Figure 97 montre que les sujets experts en condition EID ont tendance à plus naviguer de manière descendante que ceux en condition PID (moyenne=52.81 et 51.52 ; écart type=21.29 et 33.96). Ces résultats vont dans le sens de l'hypothèse H4. Chez les sujets novices, la différence semble plus prononcée entre les deux conditions (moyenne=54.68 et 37.05 ; écart type=26.07 et 35.74 ; $p>0.30$). Néanmoins, aucun des résultats obtenus n'est significatif. L'hypothèse H4 ne peut donc pas être validée.

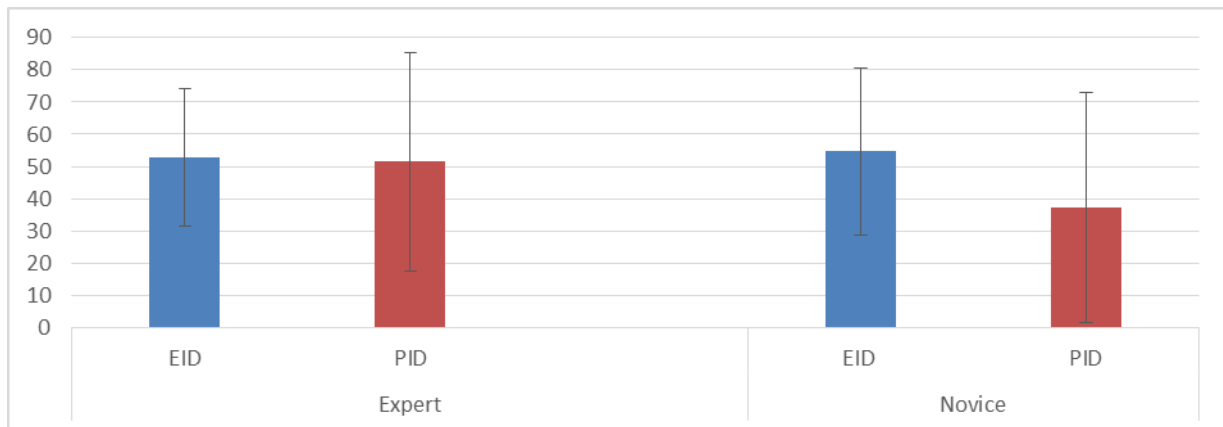


Figure 97 : Proportions de liens descendants

1.5. Discussion

- ***Différence de cheminement cognitive EID versus PID***

La centralité cognitive qui bien que plus proche du niveau processus en condition écologique pour les populations d'experts ne semble pas être significativement différente de

la centralité cognitive de la condition conventionnelle. Cette constatation semble se répliquer avec une population de novice. Le niveau d'abstraction est légèrement plus proche des fonctions abstraites en condition PID par rapport à la condition EID. L'hypothèse H1 ne peut, donc, pas être validée. La différence d'homogénéité dans les scénarios pourrait expliquer en partie ces résultats. En effet d'un scénario à l'autre, le niveau de centralité cognitive des interfaces évolue, le scénario 3 étant particulièrement traité avec une centralité proche des fonctions abstraites par rapport au reste des scénarios et ceux-ci pour l'ensemble des conditions écologique ou conventionnelle.

L'interface écologique générée par Anaxagore semble permettre une prédominance des cheminements cohérents dans la HA. En effet, on observe de manière significative un plus grand nombre de liens cohérents en conditions écologiques par rapport à la condition conventionnelle. Ce constat semble se répliquer pour la population novice. L'hypothèse H3 est donc validée.

Le nombre de liens descendants par rapport au nombre de liens ascendants est très légèrement en faveur des interfaces écologiques, mais cette différence n'est pas significative. L'hypothèse H4 ne peut donc être validée. L'indicateur de liens descendants caractérise le niveau d'expertise d'un sujet par rapport à un domaine de travail (Morineau & Billet, 2007). Il semble donc cohérent que l'on n'observe aucune différence significative entre les deux populations, les deux populations des deux premiers groupes, étant des populations d'experts.

Si on représente de manière graphique le cheminement cognitif de l'opérateur expert en fonction de sa probabilité locale et selon le type d'interface pour le scénario 3, l'on constate que les probabilités les plus fortes concernent les liens qui sont descendants et cohérents (Figure 98 et Figure 99). La probabilité locale de passer du niveau fonction généralisé au niveau fonction physique approche les 100% avec l'échantillon d'opérateurs ayant réalisé les scénarios en condition écologique. L'on remarque également que la probabilité d'avoir un cheminement cognitif intra niveau est très présente en particulier au niveau des fonctions abstraites et du niveau des fonctions physiques. Ce cheminement cognitif semble logique et en accord avec la performance des opérateurs. On remarquera enfin de fort échange entre les niveaux fonctions généralisées et fonctions physiques, les opérateurs étant descendus au niveau des fonctions physiques remontent souvent aux niveaux adjacents à savoir le niveau des fonctions généralisées.

A contrario, on observe chez les opérateurs experts en condition conventionnelle un parcours cognitif présentant une plus forte probabilité de connaître des cheminements ascendants et d'avoir des liens non cohérents. Tout particulièrement ce phénomène s'observe entre le niveau des fonctions physiques et le niveau des fonctions abstraites. L'on y constate une probabilité d'environ 66%. La probabilité d'avoir des liens intra niveau est également très élevée (60%). De manière générale les probabilités locales de transiter par le niveau des fonctions généralisées semblent plus faibles au vu de ces graphiques.

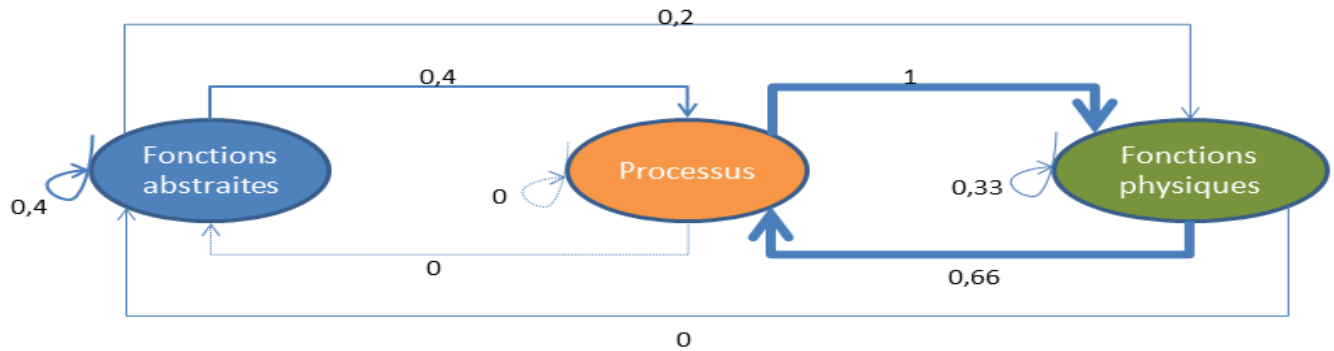


Figure 98 : Carte cognitive de l'expert avec les valeurs de probabilité locale en condition EID pour le scénario 3

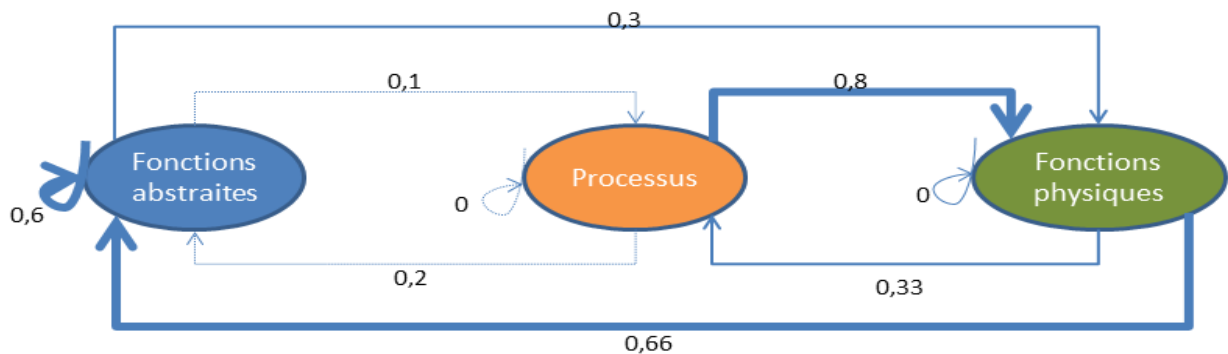


Figure 99 : Carte cognitive de l'expert avec les valeurs de probabilité locale en condition PID pour le scénario 3

- **Corrélation performance**

Dans cette dernière analyse, nous avons repris les performances mesurées, sur la précision du diagnostic, lors la première expérience, et nous avons cherché à vérifier les corrélations entre ces performances et les différents indicateurs de cheminement cognitif. De manière globale, ces performances sont meilleures pour les sujets en condition écologique par rapport aux sujets en condition conventionnelle. Parallèlement à cela, les performances des sujets en condition écologique sont moins sensibles aux variations que ceux en condition conventionnelle. Parallèlement, l'on constate que, quel que soit l'indicateur du cheminement cognitif choisi, il y a une plus forte variabilité en condition conventionnelle par rapport à la condition écologique. Les interfaces écologiques semblent donc montrer une plus grande robustesse par rapport aux interfaces conventionnelles. Ces travaux rejoignent ceux de Borst (Borst et al., 2014) qui précisent que les interfaces écologiques ont pour but de favoriser la robustesse des performances des opérateurs face à des situations complexes.

Si on examine de plus près les liens entre performances et indicateurs de cheminement cognitif pour des sujets experts, l'on constate alors que la proportion de liens descendants dans la hiérarchie d'abstraction et la proportion de liens cohérents expliquent à respectivement 70,18 et 70,13 % la performance des opérateurs (Figure 100 et Figure 101). Ces résultats originaux semblent aller dans le sens des travaux démontrant que les sujets

experts favorisent un cheminement cognitif descendant (Vicente, 1999). L'indicateur cognitif relatif à la proportion de liens descendants permettrait de faire ressortir l'expertise d'un sujet par rapport à un domaine de travail et pourrait donc expliquer les bonnes performances d'un sujet par rapport à un problème dans ce domaine de travail. Également, une corrélation forte entre performance et cheminement cohérent confirme les travaux de Vicente et réaffirme la nécessité de concevoir des interfaces favorisant un cheminement calqué sur la matrice de domaine de travail.

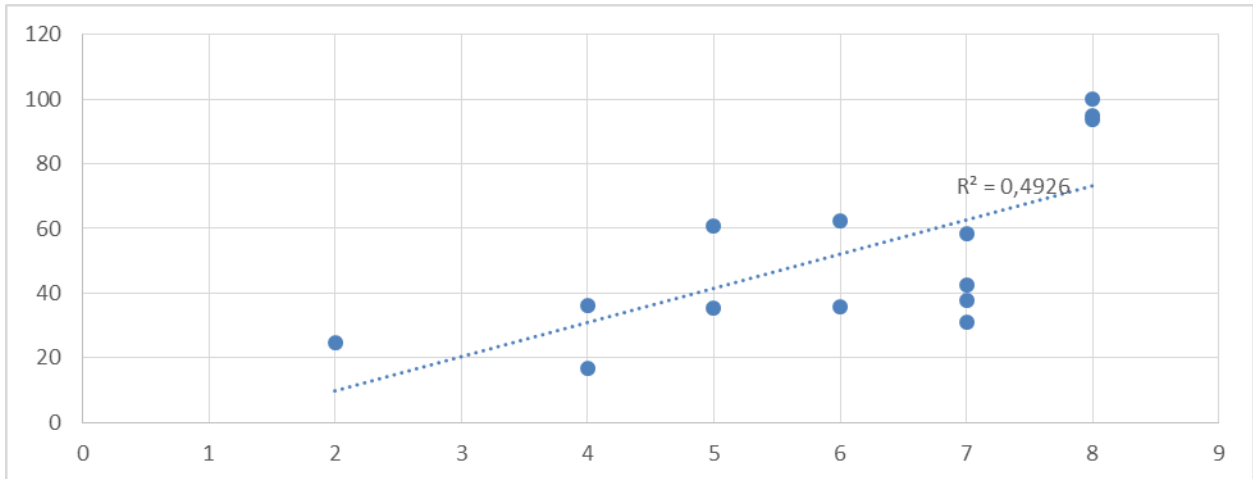


Figure 100 : Corrélation performance / liens descendants pour les sujets experts

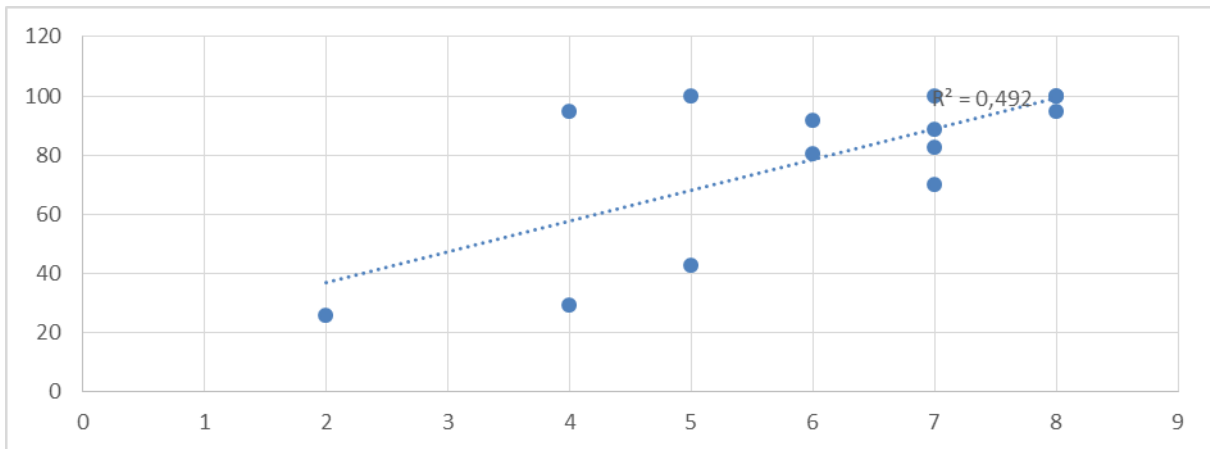


Figure 101 : Corrélation performance/liens cohérents pour les sujets experts

Enfin une dernière corrélation forte, concernant le caractère central du niveau fonction généralisée ressort. Ce résultat rejoint celui de Morineau et Billet (2010) faisant émerger d'une analyse du cheminement cognitif d'un expert sur un domaine de travail associé à la finance, le caractère central du niveau «des fonctions généralisées » de la HA. Ces auteurs expliquent le caractère central du niveau «des fonctions généralisées » par sa capacité à diriger les actions des opérateurs. Les fonctions généralisées correspondent à des concepts abstraits élaborés par les opérateurs de manière à pouvoir synthétiser de manière opérationnelle un ensemble de variables à manipuler (les fonctions physiques de la HA) (Potter et al., 2002). Ce niveau semble assurer la transition des informations abstraites aux informations concrètes nécessaires pour résoudre un problème. Ce lien fait défaut et n'est

pas explicitement représenté sur les interfaces conventionnelles. Il est par contre présent sur les interfaces écologiques. Cette différence semble avoir des conséquences sur la capacité à résoudre efficacement un problème.

- ***Différence de cheminement cognitif expert versus débutant***

Du fait de la perte importante de sujets pour cette condition, les résultats obtenus ne peuvent servir à généraliser et à valider les hypothèses. Néanmoins plusieurs tendances similaires aux résultats obtenus dans l'expérimentation menée auprès d'experts se dégagent dans la comparaison entre interface écologique et interface conventionnelle. La principale correspond à une tendance significative chez les novices à avoir des liens cohérents en condition écologique par rapport à la condition interface conventionnelle.

Au vu de la littérature, on pourrait s'attendre à observer un nombre moins important de liens descendants chez les novices par rapport aux sujets experts. En moyenne, on constate qu'interface écologique et interface conventionnelle regroupées, qu'il y a de plus grandes proportions de parcours descendants chez les sujets experts par rapport aux sujets novices. Ces observations semblent, aller dans le sens de nos hypothèses sur la prédominance des sujets experts à privilégier des cheminements cognitifs descendants.

2. Évaluation heuristique ou évaluation experte de prototypes générées par Anaxagore

2.1. Définition

Une évaluation experte est généralement réalisée par un expert en ergonomie. Ce spécialiste évalue un logiciel ou une partie d'un logiciel en vérifiant la conformité de celui-ci avec des critères ergonomiques (Scapin & Bastien, 1997) (Nielsen, 1994) (Smith & Mosier, 1986). En partageant un même ensemble de critères, plusieurs évaluateurs peuvent effectuer le travail d'évaluation, en comparant leurs résultats respectifs. Les problèmes mis en lumière par plusieurs de ces évaluateurs sont alors prioritaires. De plus, comme les évaluations reposent sur des critères bien précis dont la compréhension est partagée par tous, relativement peu de place est laissée à la subjectivité. La subjectivité est un des pièges de l'évaluation ergonomique au même titre que les présomptions sur les caractéristiques des utilisateurs. Pour déterminer le nombre d'experts nécessaire pour une évaluation experte pointant la majorité des défauts d'une interface, Nielsen and Landauer (93) démontre qu'avec 5 experts l'on peut recouvrir près de 75 % des problèmes d'utilisabilité d'une interface (Figure 102).

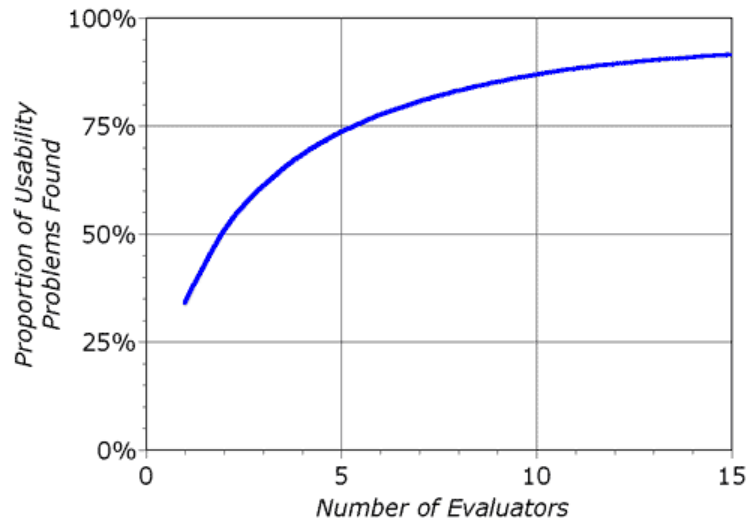


Figure 102 : Ratio nombre d'évaluateurs, nombres de problèmes d'utilisabilité détectés Nielsen et Landauer (93)

Dans un cycle d'évaluation, cette approche d'analyse experte permet de manière relativement abordable et rapide d'évaluer une interface, nous avons donc décidé de compléter les études expérimentales par une analyse experte.

2.1.1. Caractéristiques des évaluateurs

Cette évaluation repose sur la synthèse des notes et commentaires de 4 évaluateurs, tous ergonomes de formation. D'après la proposition de Nielsen et Landauer, ce nombre d'évaluateurs permettrait de détecter environ 70% des problèmes d'utilisabilité. (Tableau 18).

Tableau 18 : Caractéristique des évaluateurs

Spécialité	Âge	Niveau d'étude en ergonomie	À déjà effectué au moins une évaluation experte basée sur des guidelines
Ergonome IHM	24	Master 2 en ergonomie	Oui
Ergonome IHM	28	Doctorat en ergonomie	Oui
Ergonome IHM	27	Doctorat en ergonomie	Oui
Ergonome IHM	23	Master 2 en ergonomie	Oui

2.1.2. Évaluations expertes

L'évaluation experte a été menée au vu de la grille de cotation créée par Ponsa (Annexe 7 et Annexe 8). Cette grille d'évaluation est particulièrement adaptée aux interfaces de supervision comme celle générée par Anaxagore (voir chapitre cadre théorique). Nous présentons ici la synthèse des évaluations portant sur le prototype d'interface écologique utilisé durant les expérimentations réalisées préalablement à Nantes et à Etel. Après une présentation de 45 minutes de la grille de Ponsa, les 4 évaluateurs avaient pour consigne

d'effectuer une évaluation experte au vu de cette grille. L'ensemble des notes était retranscrit de manière manuelle par l'examineur de l'interface. Le Tableau 19 répertorie l'ensemble des notes moyennes et commentaires émis par les évaluateurs.

Tableau 19 : Tableau des scores moyens des 4 évaluateurs experts

Critères ergonomiques	Note moyenne des évaluateurs	Commentaires
Architecture	14/15	La présentation un chemin de l'information (Ex : un fils d'Ariane) permettrait d'avoir en permanence la hiérarchie de l'information sous les yeux par exemple. Une position des boutons plus en rapport avec la logique de la hiérarchie pourrait aussi aider (Ex : présenter les boutons des 3 écrans de façon verticale et non de façon horizontale comme c'est le cas actuellement).
Distribution	15/15	
Navigation	9/10	Des confusions au niveau des écrans production et distribution sont possibles. De plus, la navigation entre la synthèse de haut niveau et celle de bas niveau pourrait être améliorée en utilisant une navigation verticale à l'image du principe de lecture de la hiérarchie d'abstraction.
Couleur	18/25	Les spécifications pour la couleur sont dans l'ensemble jugées satisfaisantes, mais sont plus faibles que les autres catégories. Un travail sur les couleurs utilisées sur les widgets de haut niveau pourrait être fait pour plus de cohérence avec les couleurs des informations de bas niveau et le texte. Le nombre de couleurs utilisées dépasse 7 mais cela provient du besoin de symboliser l'ensemble des fluides du processus.
Police du texte	14/20	Plusieurs évaluateurs ont jugé la police d'écriture pour les informations sur le schéma de bas niveau trop petites. Un problème a également été signalé sur les abréviations utilisées, trop nombreuses et pas tout le temps adéquates.
Statut d'affichage	10/10	
Valeurs des processus	9.5/10	Un évaluateur a jugé les valeurs sur le processus trop petites et donc difficilement visible.
Graphiques et tableaux	19.5/20	
Commandes des données en entrées	15/15	Les évaluateurs ont noté une certaine difficulté à vérifier pleinement ce critère sur les maquettes au moment de l'évaluation, une évaluation ultérieure semble pertinente.
Alarmes	25/25	

2.2. Note globale

La note moyenne de l'interface est de 4.51/5. Ce qui au vu des prescriptions de Ponsa, préconisant d'avoir une note autour de 3 à 4 points et de manière optimale proche de 5, est tout à fait satisfaisant. L'interface écologique générée par Anaxagore semble donc relativement solide d'un point de vue ergonomique selon l'évaluation experte.

3. Bilan

Le prototype d'interface écologique généré pour la supervision d'un système d'eau douce sanitaire embarquée à bord d'un navire semble démontrer une bonne ergonomie générale. L'évaluation experte montre que globalement les écrans produits sont d'un haut niveau de satisfaction ergonomique. Une amélioration au niveau des abréviations et du codage couleur pourrait permettre de renforcer l'utilisabilité des interfaces de supervision générées par Anaxagore.

L'évaluation expérimentale conforte les résultats de l'analyse experte à savoir la capacité des interfaces écologiques à assurer via une conception ergonomique de bonnes performances pour la détection et la résolution de situations problématiques complexes. Les résultats de l'expérimentation 1 montrent qu'à l'exception du scénario 4 les interfaces

écologiques permettent de meilleures performances en termes d'efficacité au diagnostic. De plus, les interfaces écologiques permettent également de meilleures performances de détection pour les scénarios 1 et 3. Néanmoins, des problèmes liés aux spécificités des scénarios et un manque d'entraînement pourraient expliquer un temps de détection non significative pour les conditions 2 et 4. Dans un second temps, l'évaluation des interfaces avec la technique du cheminement cognitif montre une capacité des interfaces écologiques à garantir un déplacement cohérent par rapport à la HA ce qui est cohérent avec les travaux de Vicente (Vicente, 1999). Les autres indicateurs cognitifs ne dégagent pas de tendance significative néanmoins les interfaces écologiques tendent à montrer une prédominance en liens descendants et une centralité cognitive proche du niveau des fonctions généralisées. Enfin la corrélation des indicateurs de prédominance de liens cohérents et de de liens descendants avec la performance des opérateurs face aux différents problèmes renforce nos hypothèses sur l'importance de concevoir des interfaces favorisant ces indicateurs.

Conclusion générale et perspectives

Après près de 25 années d'existence, la conception écologique d'interface n'a cessé de gagner, d'année en année, en maturité. Cette maturation est passée par des étapes de validation du principe de conception, de clarification de la méthode ((Vicente, 1999), (Burns & Hajdukiewicz, 2013), (Bennett & Flach, 2011)) et par son application à de nombreux domaines (voir chapitre 1). Néanmoins, la conception d'interface écologique n'a pas encore franchi le pas de l'utilisation à grande échelle de ces principes, ceux-ci pour de multiples raisons évoquées au cours de ce manuscrit. Dans cette thèse, nous ancrons les bases d'un outil, Anaxagore, en mesure de franchir ce fossé. Anaxagore véritable catalyseur des connaissances ergonomiques sur la conception écologique permet aujourd'hui de passer d'une analyse de domaine de travail à une IHM écologique. Mieux encore, Anaxagore complété de l'outil de vérification TMTA, permet de garantir la qualité des interfaces générées. Anaxagore, fruit de la collaboration de deux mondes complémentaires l'ergonomie et l'informatique, favorise un cheminement cognitif cohérent dans un domaine de travail, ce qui a pour conséquence d'accompagner l'opérateur vers de bonnes performances dans la précision du diagnostic. Ce résultat est capital, car face aux enjeux socio-économiques et humains que représentent les systèmes complexes (navire, centrale, avion...), l'importance de concevoir des interfaces hommes machines solides et robustes face à une multitude d'évènements potentiellement catastrophiques, s'avère primordiale.

- **Rappels de la contribution**

Après un tour d'horizon actualisé de la conception à l'application des principes de conception écologique, nos travaux se sont penchés sur la question de la validation et la vérification du domaine de travail. Cette étape est importante afin de garantir la qualité du modèle d'interface proposé pour la suite. En effet si une matrice de domaine travail est mal conçue (absence de certaines affordances ou mauvais positionnement d'affordances), l'opérateur sera mis en difficulté par l'IHM écologique représentatif d'un domaine incorrect. Le domaine de travail sert de modèle à la structure de l'IHM et aux informations affichées à l'utilisateur. Si ce modèle est incomplet ou erroné, l'opérateur aura pour référentiel une vision biaisée. Avec l'outil de TMTA, nous apportons de manière originale au vu de la littérature un outil de vérification et validation formalisé et opérationnel. L'outil repose sur deux principales étapes. La première consiste à la création d'un ou plusieurs scénarios critiques permettant de vérifier le domaine de travail. La seconde correspond à la validation

du domaine par le déroulement du scénario au vu de la méthode TMTA, par l'outil développé.

La seconde contribution est la formalisation de la conception écologique d'une interface. Cette formalisation s'est traduite par son intégration dans un outil logiciel de génération automatique d'IHM. Cet outil propose plusieurs réponses aux limites sur la conception d'interface écologique initialement soulevées par Vicente, (2002). La première et principale concerne la possibilité de transformer les informations d'un domaine de travail en une interface écologique. L'opérateur peut retranscrire l'intégralité des informations d'un domaine de travail par l'intermédiaire de deux schémas réalisés sous Microsoft Visio, en une interface écologique. La seconde est la réduction du saut créatif, nécessaire jusqu'à présent pour traduire les relations entre les données d'un domaine de travail en représentations écologiques favorables aux principes de perception directe. En effet, nous proposons d'automatiser le processus de traduction, en reprenant les principes développés par Liu et al, avec l'association automatique d'un processus à une relation mathématique. Cette relation mathématique est elle-même associée à une représentation graphique spécifique. Cette capitalisation passe par la création d'une bibliothèque d'éléments écologiques capable de répondre à la multitude de relations mathématiques possibles. La troisième réponse est directement liée à ce principe de bibliothèque, le concepteur n'ayant pas à recréer à chaque nouveau projet de nouvelles représentations, cela implique une réduction importante du temps dédié à la conception. Cette réduction est difficile à quantifier et très variable d'un projet à l'autre. Enfin la dernière solution qu'offre Anaxagore, est la possibilité de réaliser beaucoup plus tôt dans le processus de conception d'interface, des tests utilisateurs, les prototypes d'interfaces générées étant produits beaucoup plus rapidement, les concepteurs peuvent ajuster au plus tôt la conception en fonction des besoins réels des utilisateurs.

Enfin la dernière contribution porte sur la vérification expérimentale des interfaces écologiques. Cette vérification a montré de manière originale que les interfaces écologiques générées par Anaxagore étaient plus favorables à un cheminement cohérent dans le domaine de travail par rapport aux interfaces conventionnelles générées par le même flot de conception. De même, cet indice de cheminement cohérent, favorable aux interfaces écologiques, explique fortement la bonne précision du diagnostic des opérateurs. Une corrélation avec la performance a également été montrée avec l'indicateur de cheminement descendant. Tous ces éléments semblent donc plaider vers une bonne qualité des interfaces écologiques générées automatiquement par le flot de conception Anaxagore et font émerger l'importance des indicateurs de cohérence et de cheminement descendant au regard d'un domaine de travail.

- **Perspectives**

Nous avons évoqué au cours de ce manuscrit les perspectives en termes d'intégration spatiale et temporelle des interfaces écologiques générées cependant d'autres pistes semblent envisageables pour les années à venir en particulier sur les notions d'adaptions des interfaces en fonctions du contexte.

La première piste concerne la réplication de la démarche à d'autres domaines de travail et l'enrichissement de la bibliothèque. Tout d'abord tout au long de ce manuscrit nous avons pris pour cadre d'application un système d'eau douce naval, mais il s'agira d'expérimenter la démarche sur d'autres types systèmes navals comme le système des eaux grises et noires. Mais également, il s'agira de tester la démarche sur d'autre secteur d'application de la supervision que le naval comme le nucléaire ou l'aérien. La création de nouveaux widgets écologiques, spécifiques à de nouveaux types de relations mathématiques pourra également être envisagée. Ces nouveaux widgets viendront alors compléter la bibliothèque.

La seconde piste aborde le problème de l'interface d'équipe d'un point de vue du travail d'équipe. En effet, à l'heure actuelle, si l'on reprend l'exemple de la supervision de système naval, les interfaces générées par Anaxagore permettent à l'opérateur de visualiser tout le domaine de travail. Cet opérateur a alors l'ensemble des niveaux d'abstractions de représentés, des objectifs aux niveaux les plus concrets. Cependant cet opérateur n'intervient que très peu au niveau des plus concrètes que sont par exemple les formes physiques. Ce niveau est généralement plus utilisé par l'opérateur salle de machine. A contrario, le chef de quart en passerelle aura une vision plus globale du navire et utilisera le plus souvent les hauts niveaux de la hiérarchie d'abstraction et tout particulièrement celui des objectifs du système. Le chef mécanicien chargé de la supervision du système interviendra quant à lui majoritairement au niveau des fonctions abstraites et des fonctions généralisées (Figure 103). Chacun de ces intervenants a son propre langage du système, l'interface écologique générée par Anaxagore va permettre à chacun de ces interlocuteurs de dialoguer et de se comprendre. L'ensemble de ces interlocuteurs forment une équipe, car ils forment un groupe de plus deux entités dirigées vers un but commun (faire avancer le navire) pour lequel on assigne un rôle spécifique impliquant différentes fonctions dans un temps limité (Salas, Prince, Baker, & Shrestha, 1995). Ceci amène à réfléchir sur un indicateur déjà utilisé à un niveau individuel par le passé pour vérifier la performance des interfaces écologiques : la conscience de la situation (Burns et al., 2008). En effet, la conscience de la situation appliquée à une équipe implique que la cognition d'une équipe sera la même qu'un seul opérateur supervisant un système (Kaber & Endsley, 1998). De récents travaux sur la mesure de la conscience de la situation d'une équipe émettent la possibilité d'une évaluation de cette dernière selon différents protocoles comme celui de l'analyse du protocole verbale (Lee, Park, ryum Kim, & Seong, 2012). Une évaluation complémentaire des interfaces écologiques générées du système de supervision d'un navire

pourrait être menée au vu de ces techniques. De même, une série de travaux pourrait être réalisée dans l'objectif de favoriser les performances en terme de conscience de la situation partagée en proposant plusieurs innovations aux interfaces écologiques générées (exemple : possibilité pour un opérateur de suivre sur l'interface le cheminement cognitif d'une demande en fonction des différents interlocuteurs). Enfin une analyse du cheminement cognitif pourrait être réalisée d'un point de vue collectif afin de voir comment une équipe va naviguer cognitivement sur le domaine de travail partagé par l'ensemble de ces membres.

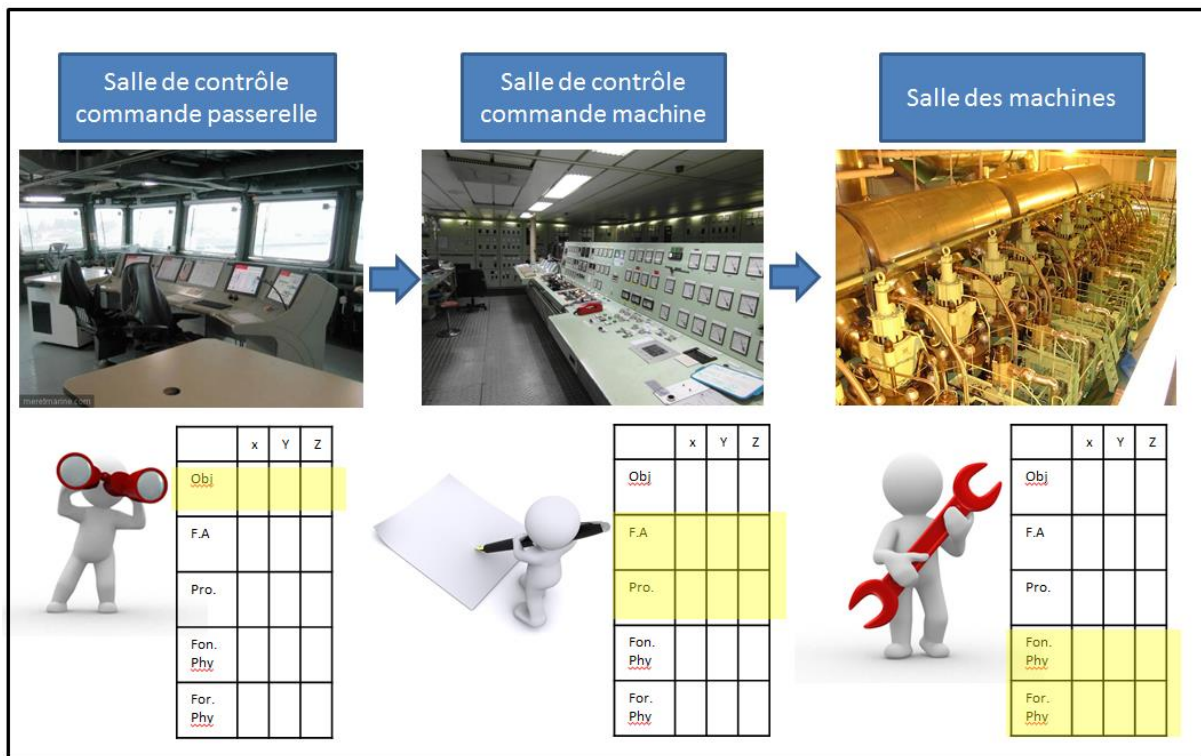


Figure 103 : Travail en équipe et partage d'un domaine de travail commun

Une troisième perspective concerne la question de l'instrumentation du système nécessaire pour concevoir une interface écologique. À l'heure actuelle, et pour les besoins de l'expérimentation, toutes les informations ressorties de l'analyse du domaine de travail et jugées nécessaires dans le but d'obtenir une interface écologique, ont été instrumentées, ce qui appliqué à un contexte industriel ne serait pas rentable économiquement. À titre d'exemple, le coût d'un capteur industriel de débit d'eau est en moyenne de 500 à 1000 euros, ce qui multiplié par le nombre d'informations supplémentaires que nécessite une conception écologique représente un coût supplémentaire de 4000 à 8000 euros rien qu'en capteurs de débit. Le coût de revient d'une conception écologique comprenant toutes les informations extraites, identifiées comme nécessaires, alourdit de manière importante la facture finale de conception. Une solution résidera sûrement sur la récupération d'une partie des informations nécessaires par la technique de l'inférence de données et une observation indirecte. Il pourra alors s'agir de tester de nouveau l'impact de la performance des opérateurs en fonctions du niveau d'instrumentation du système et de la part

d'information déduite d'autres informations. Nous renverrons également le lecteur sur la page 76 du chapitre 1 faisant référence aux travaux sur la fiabilité des informations en fonctions du niveau d'instrumentation du système.

Enfin une étude complémentaire regroupant plus d'étudiants novices devrait être menée pour comparer les performances et les indices de cheminement cognitif en fonction du niveau d'expertise de manière complète et statiquement solide.

Toutes ces perspectives ouvrent la voie à plusieurs améliorations pour la génération automatique d'interfaces écologiques, mais également ouvrent la porte à une plus grande intégration de ce type de conception dans le monde industriel d'aujourd'hui et de demain à travers une génération facilitée et plus rapide.

Références bibliographiques

- Achon, J., & Jamieson, G. A. (2003). Work domain analysis of a financial system: An abstraction hierarchy for portfolio management. In *Proc. of the 22nd European Annual Conference on Human Decision Making and Control* (pp. 103–109). Citeseer. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.92.8202&rep=rep1&type=pdf>
- Beltracchi, L. (1995). An OLE interface concept for rankine cycle based heat engines. In *Topical Meeting of the American Nuclear Society: Computer Display and Support Systems. Philadelphia, PA*.
- Benbasat, I., & Todd, P. (1993). An experimental investigation of interface design alternatives: icon vs. text and direct manipulation vs. menus. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38(3), 369–402.
- Bennett, K. B., & Flach, J. M. (1992). Graphical displays: Implications for divided attention, focused attention, and problem solving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 34(5), 513–533.
- Bennett, K. B., & Flach, J. M. (2011). *Display and interface design: Subtle science, exact art*. CRC Press. Retrieved from <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=bSDHLUafkRcC&oi=fnd&pg=PP1&dq=benette+flach+2011+&ots=Br5UfeMdND&sig=WTTGf8fBi2ezkuwpYBBbXy7sG74>
- Bennett, K. B., & Flach, J. M. (2012). Visual momentum redux. *International Journal of Human-Computer Studies*, 70(6), 399–414.
- Bennett, K. B., Posey, S. M., & Shattuck, L. G. (2008). Ecological interface design for military command and control. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2(4), 349–385.
- Beuthel, C., Boussoffara, B., Elzer, P., Zinser, K., & Tillsen, A. (1995). Advantages of mass-data-displays in process S&C. In *Int. Fed. Automatic Control Symp., Cambridge, MA*.
- Bignon, A. (2012, July 10). *Génération conjointe de commandes et d'interfaces de supervision pour systèmes sociotechniques reconfigurables*. Université de Bretagne Sud. Retrieved from <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00735869>
- Bignon, A., Rossi, A., & Berruet, P. (2013). An integrated design flow for the joint generation of control and interfaces from a business model. *Computers in Industry*, 64(6), 634–649.
- Birrell, S. A., Young, M. S., Jenkins, D. P., & Stanton, N. A. (2012). Cognitive Work Analysis for safe and efficient driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 13(4), 430–449.
- Bisantz, A. M., & Vicente, K. J. (1994). Making the abstraction hierarchy concrete. *International Journal of Human-Computer Studies*, 40(1), 83–117. <http://doi.org/10.1006/ijhc.1994.1005>
- Blanche, C. (2010). *Contribution à l'ingénierie cognitive pour l'évaluation et la conception de systèmes d'information: application au livre électronique et à une base de données d'archive*. Lorient. Retrieved from <http://www.theses.fr/2010LORIL173>
- Bodart, F., Hennebert, A.-M., Leheureux, J.-M., & Vanderdonckt, J. (1995). A model-based approach to presentation: A continuum from task analysis to prototype. In *Interactive Systems: Design, Specification, and Verification* (pp. 77–94). Springer. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-87115-3_6

- Borillo, M. (1984). *Informatique pour les sciences de l'homme: limites de la formalisation du raisonnement*. Editions Mardaga. Retrieved from <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=dUUpZOOa9Y8C&oi=fnd&pg=PA5&dq=formalisation+et+informatique&ots=xV01YMMprC&sig=urT4vadWMUR82JO9NQ-oEu2dZTE>
- Borst, C., Flach, J. M., & Ellerbroek, J. (2014). Beyond Ecological Interface Design: Lessons From Concerns and Misconceptions. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6963425
- Borst, C., Sjer, F. A., Mulder, M., Van Paassen, M. M., & Mulder, J. A. (2008). Ecological approach to support pilot terrain awareness after total engine failure. *Journal of Aircraft*, 45(1), 159–171.
- Bullemer, P., Vernon Reising, D., Burns, C., Hajdukiewicz, J., & Andrzejewski, J. (2008). ASM Consortium Guidelines—Effective Operator Display Design. *Houston, Honeywell International Inc./ASM Consortium*.
- Burkhardt, J.-M., & Sperandio, J.-C. (2004). Ergonomie et conception informatique. *Ergonomie*, 437–450.
- Burns, C. M. (2000a). Navigation strategies with ecological displays. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(1), 111–129.
- Burns, C. M. (2000b). Putting it all together: Improving display integration in ecological displays. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 42(2), 226–241.
- Burns, C. M., Bisantz, A. M., & Roth, E. M. (2004). Lessons from a comparison of work domain models: Representational choices and their implications. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(4), 711–727.
- Burns, C. M., Bryant, D. J., & Chalmers, B. A. (2001). Scenario Mapping with Work Domain Analysis. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 45(4), 424–428. <http://doi.org/10.1177/154193120104500434>
- Burns, C. M., & Hajdukiewicz, J. (2013). *Ecological interface design*. CRC Press. Retrieved from https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=P8pc1sYpoN4C&oi=fnd&pg=PR7&dq=burns+ecological+interface+design+&ots=nn24mS_1mu&sig=B5ldppe_l4dbnFyychqnp2ux-l
- Burns, C. M., Ho, G., & Arrabito, G. R. (2011). Mapping ecologically to modalities. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 55, pp. 335–339). SAGE Publications. Retrieved from <http://pro.sagepub.com/content/55/1/335.short>
- Burns, C. M., Skraaning, G., Jamieson, G. A., Lau, N., Kwok, J., Welch, R., & Andresen, G. (2008). Evaluation of ecological interface design for nuclear process control: situation awareness effects. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(4), 663–679.
- Burns, C. M., & Vicente, K. J. (1995). Physical and functional displays in process supervision and control (CEL 95-11). *Toronto, Canada: Cognitive Engineering Laboratory, University of Toronto for ABB Corporate Research, Heidelberg*, 7.
- Carayon, P. (2006). Human factors of complex sociotechnical systems. *Applied Ergonomics*, 37(4), 525–535.
- Cardosi, K., & Hannon, D. (1999). *Guidelines for the Use of Color in ATC Displays*. DTIC Document. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA367984>

- Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). Étude des propriétés de la version francophone du NASATLX. In *Communication présentée à la cinquième édition du colloque de psychologie ergonomique (Epique)*. Retrieved from http://webcom.upmf-grenoble.fr/lpnc/IMG/pdf/Cegarra_Morgado_2009_EPIQUE_.pdf
- Chalmers, B. A., Burns, C. M., & Bryant, D. J. (2001). Work domain modeling to support shipboard command and control. In *Proceedings of the 6th International Command and Control Research and Technology Symposium, Annapolis, MD*. Retrieved from http://dodccrp.org/events/6th_ICCRTS/Tracks/Papers/Track4/026_tr4.pdf
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive: Théorie et applications*. Armand Colin.
- Chi, M. T., Glaser, R., & Rees, E. (1981). *Expertise in problem solving*. DTIC Document. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA100138>
- Christoffersen, K., Hunter, C. N., & Vicente, K. J. (1996). A longitudinal study of the effects of ecological interface design on skill acquisition. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 38(3), 523–541.
- Cleveland, W. S., & McGill, R. (1984). Graphical perception: Theory, experimentation, and application to the development of graphical methods. *Journal of the American Statistical Association*, 79(387), 531–554.
- Dainoff, M. J., Dainoff, C. A., & McFeeters, L. (2004). On the application of cognitive work analysis to the development of a commercial investment software tool. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 48, pp. 595–599). SAGE Publications. Retrieved from <http://pro.sagepub.com/content/48/3/595.short>
- Dal Vernon, C. R. (2000). The abstraction hierarchy and its extension beyond process control. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 44, pp. 194–197). SAGE Publications. Retrieved from <http://pro.sagepub.com.sci-hub.org/content/44/1/194.short>
- Dal Vernon, C. R., & Sanderson, P. M. (1998). Designing displays under ecological interface design: Towards operationalizing semantic mapping. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 42, pp. 372–376). SAGE Publications. Retrieved from <http://pro.sagepub.com/content/42/3/372.short>
- Dal Vernon, C. R., & Sanderson, P. M. (2000). Testing the impact of instrumentation location and reliability on ecological interface design: Control performance. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 44, pp. 124–127). SAGE Publications. Retrieved from <http://pro.sagepub.com/content/44/1/124.short>
- Dal Vernon, C. R., & Sanderson, P. M. (2002a). Work domain analysis and sensors II: Pasteurizer II case study. *International Journal of Human-Computer Studies*, 56(6), 597–637.
- Dal Vernon, C. R., & Sanderson, P. M. (2002b). Work domain analysis and sensors I: principles and simple example. *International Journal of Human-Computer Studies*, 56(6), 569–596.
- Drivalou, S., & Marmaras, N. (2009). Supporting skill-, rule-, and knowledge-based behaviour through an ecological interface: An industry-scale application. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(6), 947–965.
- Endsley, M. R., & Jones, W. (2013). Situation awareness. *The Oxford Handbook of Cognitive Engineering*, 88–108.

- Fitts, P. M., & Seeger, C. M. (1953). SR compatibility: spatial characteristics of stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, 46(3), 199.
- Flach, J. M., Tanabe, F., Monta, K., Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1998). An ecological approach to interface design. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 42, pp. 295–299). SAGE Publications. Retrieved from <http://pro.sagepub.com/content/42/3/295.short>
- Flach, J. M., & Vicente, K. J. (1989). Complexity, difficulty, direct manipulation and direct perception. Retrieved from <http://corescholar.libraries.wright.edu/psychology/401/>
- Gajos, K. Z., Weld, D. S., & Wobbrock, J. O. (2010). Automatically generating personalized user interfaces with Supple. *Artificial Intelligence*, 174(12), 910–950.
- Garabet, A., & Burns, C. M. (2004). Collaboration with Ecological Interface Design. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 48(3), 543–546. <http://doi.org/10.1177/154193120404800357>
- Gibson, J. (1992). *J.(1979). The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Goubali, O., Bignon, A., Berruet, P., Girard, P., & Guittet, L. (2014). Anaxagore, an example of model-driven engineering for industrial supervision. In *Proceedings of the 2014 Ergonomie et Informatique Avancée Conference-Design, Ergonomie et IHM: quelle articulation pour la co-conception de l'interaction* (pp. 58–65). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2671478>
- Gronier, G., & Gomri, S. (2008). Étude des métaphores temporelles sur la perception du temps d'attente. In *Proceedings of the 20th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine* (pp. 205–208). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1512754>
- Hall, D. S., Shattuck, L. G., & Bennett, K. B. (2012). Evaluation of an ecological interface design for military command and control. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 6(2), 165–193.
- Hall, T. J., Rudolph, J. W., & Cao, C. G. (2006). Fixation and attention allocation in anesthesiology crisis management: an abstraction hierarchy perspective. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 50, pp. 1064–1067). SAGE Publications. Retrieved from <http://pro.sagepub.com/content/50/10/1064.short>
- Ham, D.-H., & Yoon, W. C. (2001). The effects of presenting functionally abstracted information in fault diagnosis tasks. *Reliability Engineering & System Safety*, 73(2), 103–119.
- Hansen, J. P. (1995). An experimental investigation of configural, digital, and temporal information on process displays. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(3), 539–552.
- Hilliard, A., & Jamieson, G. A. (2008). Winning solar races with interface design. *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications*, 16(2), 6–11.
- Howie, D. E., & Vicente, K. J. (1998). Measures of operator performance in complex, dynamic microworlds: Advancing the state of the art. *Ergonomics*, 41(4), 485–500.
- Hutchins, E. L., Hollan, J. D., & Norman, D. A. (1985). Direct manipulation interfaces. *Human-Computer Interaction*, 1(4), 311–338.
- Jamet, E., Le Bohec, O., & Hidrio, C. (2003). Comment présenter l'information dans les documents numériques éducatifs? Retrieved from <http://www.cairn.info/revue-document-numerique-2003-1-page-25.htm>

- Jamieson, G. A., Miller, C. A., Ho, W. H., & Vicente, K. J. (2007). Integrating task-and work domain-based work analyses in ecological interface design: A process control case study. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 37(6), 887–905.
- Jamieson, G. A., & Vicente, K. J. (2001). Ecological interface design for petrochemical applications: supporting operator adaptation, continuous learning, and distributed, collaborative work. *Computers & Chemical Engineering*, 25(7), 1055–1074.
- Janssen, C., Weisbecker, A., & Ziegler, J. (1993). Generating user interfaces from data models and dialogue net specifications. In *Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 conference on human factors in computing systems* (pp. 418–423). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=169335>
- Jiancaro, T., Jamieson, G. A., & Mihailidis, A. (2013). Twenty years of cognitive work analysis in health care a scoping review. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1555343413488391.
- John, B. E., & Kieras, D. E. (1996). The GOMS family of user interface analysis techniques: Comparison and contrast. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 3(4), 320–351.
- Judas, S., Rauffet, P., Morel, G., Chauvin, C., Berruet, P., & Toumelin, N. (2012). Évaluation de l'apport d'une interface écologique appliquée au pilotage de sous-marin. In *Proceedings of the 2012 Conference on Ergonomie et Interaction homme-machine* (p. 189). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2653435>
- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1998). Team situation awareness for process control safety and performance. *Process Safety Progress*, 17(1), 43–48.
- Kaminka, G. A., & Elmaliach, Y. (2006). Experiments with an ecological interface for monitoring tightly-coordinated robot teams. In *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on* (pp. 200–205). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1641184
- Kan, K. C., & Jamieson, G. A. (2012). Ecological Interface Design for a Water Monitoring Decision Aid. In *ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis* (pp. 791–802). American Society of Mechanical Engineers. Retrieved from <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1727417>
- Kim, S. K., Suh, S. M., Jang, G. S., Hong, S. K., & Park, J. C. (2012). Empirical research on an ecological interface design for improving situation awareness of operators in an advanced control room. *Nuclear Engineering and Design*, 253, 226–237.
- Kolski, C. (1997). *Interfaces Homme-machine: application aux systèmes industriels complexes*. Hermès.
- Kolski, C., De Keyser, V., & Millot, P. (1993). Ingénierie des interfaces homme-machine(conception et évaluation). *Traité Des Nouvelles Technologies*. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=108305>
- Lau, N., Jamieson, G. A., Skraaning, G., & Burns, C. M. (2008). Ecological Interface Design in the nuclear domain: An empirical evaluation of ecological displays for the secondary subsystems of a boiling water reactor plant simulator. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 55(6), 3597–3610.
- Lee, S. W., Park, J., ryum Kim, A., & Seong, P. H. (2012). Measuring situation awareness of operation teams in NPPs using a verbal protocol analysis. *Annals of Nuclear Energy*, 43, 167–175.

- Lew, R., Boring, R. L., Ulrich, T., & others. (2014). A prototyping environment for research on human-machine interfaces in process control use of Microsoft WPF for microworld and distributed control system development. In *Resilient Control Systems (IS RCS), 2014 7th International Symposium on* (pp. 1–6). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6900111
- Liu, Q., Nakata, K., & Furuta, K. (2002a). Display Design of Process Systems Based on Functional Modelling. *Cognition, Technology & Work*, 4(1), 48–63. <http://doi.org/10.1007/s101110200004>
- Liu, Q., Nakata, K., & Furuta, K. (2002b). Display design of process systems based on functional modelling. *Cognition, Technology & Work*, 4(1), 48–63.
- Li, X., Sanderson, P., Memisevic, R., Wong, W., & Choudhury, S. (2006). Evaluating functional displays for hydropower system: model-based guidance of scenario design. *Cognition, Technology & Work*, 8(4), 269–282.
- Luyat, M., & Regia-Corte, T. (2009). Les affordances: de James Jerome Gibson aux formalisations récentes du concept. *L'Année Psychologique*, 109(02), 297–332.
- Maguire, M. (2001). Methods to support human-centred design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(4), 587–634.
- Marcus, A. (1998). Metaphor design for user interfaces. In *CHI 98 Conference Summary on Human Factors in Computing Systems* (pp. 129–130). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=286577>
- Mazaeva, N., & Bisantz, A. M. (2014). Ecological Displays, Information Integration, and Display Format An Empirical Evaluation Across Multiple Small Displays. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1555343414521424.
- McEwen, T. R., Flach, J. M., & Elder, N. C. (2014). Interfaces to medical information systems: Supporting evidenced based practice. In *2014 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)* (pp. 335–340). <http://doi.org/10.1109/SMC.2014.6973930>
- McIlroy, R. C., & Stanton, N. A. (2015). Ecological Interface Design Two Decades On: Whatever Happened to the SRK Taxonomy? *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 45(2), 145–163. <http://doi.org/10.1109/THMS.2014.2369372>
- Meineri, S., & Morineau, T. (2014). How the psychological theory of action identification can offer new advances for research in cognitive engineering. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 15(5), 451–463.
- Miller, C. A., & Vicente, K. J. (2001). Comparison of display requirements generated via hierarchical task and abstraction-decomposition space analysis techniques. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(3), 335–355.
- Miller, C., & Vicente, K. (1998). *Comparative analysis of display requirements generated via task-based and work domain-based analyses: A test case using DURESS II*. Technical Report CEL-98-08. Cognitive Engineering Laboratory, University of Toronto. Retrieved from <http://cel.mie.utoronto.ca/wp-content/uploads/CEL98-08.pdf>
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81.
- Millot, P., & Roussillon, E. (1991). Man-machine cooperation in telerobotics: problematics and methodologies. In *Second Symposium on Robotics, Gif-sur-Yvette*.

- Morineau, T. (2010). La méthode TMTA d'analyse écologique de la tâche et son application à une tâche praxique. Retrieved from <http://www.cairn.info/revue-le-travail-humain-2010-2-page-97.htm>
- Morineau, T. (2011). Turing machine task analysis: a method for modelling affordances in the design process. *International Journal of Design Engineering*, 4(1), 58–70.
- Morineau, T., & Billet, H. (2007). L'analyse du domaine de travail et les cartes cognitives pour évaluer une IHM-Application à un Logiciel de Finances. *Revue d'Interaction Homme-Machine* Vol, 8(2). Retrieved from <http://europiaproductions.free.fr/RIHM/V8N2/6-RIHM%20Morineau-Billet%20PDF.pdf>
- Morineau, T., Frénod, E., Blanche, C., & Tobin, L. (2009). Turing machine as an ecological model for task analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10(6), 511–529.
- Morineau, T., Morandi, X., Le Moëllic, N., & Jannin, P. (2013). A cognitive engineering framework for the specification of information requirements in medical imaging: application in image-guided neurosurgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 8(2), 291–300.
- Moussa, F., & Kolski, C. (1992). Vers une formalisation d'une démarche de conception de synoptiques industriels: application au système ERGO-CONCEPTOR. In *Proceedings Colloque ERGO-IA Ergonomie et Informatique Avancée* (pp. 7–9). Retrieved from http://www.researchgate.net/profile/Christophe_Kolski/publication/276272836_Vers_une_formalisation_d'une_dmarche_de_conception_de_synoptiques_industriels_application_au_systme_ERGO-CONCEPTOR/links/55546d7908aeaaff3bf1bfbd.pdf
- Naikar, N., Hopcroft, R., & Moylan, A. (2005). *Work domain analysis: Theoretical concepts and methodology*. DTIC Document. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA449707>
- Nam, T. S., & Myung, R. (2007). The application of work domain analysis (WDA) for the development of vehicle control display. In *Proc. 7th WSEAS Int. Conf. Appl. Inform. Commun* (pp. 160–165). Citeseer. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.413.897&rep=rep1&type=pdf>
- Nielsen, J. (1994). Heuristic evaluation. *Usability Inspection Methods*, 17(1), 25–62.
- Odeh, S. (2007). Cognitive-Compatible Human-Machine Interfaces by Combining Ecological Interface Design and Object-Oriented Programming. *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, 3(1).
- O'Hara, J. M. (1990). *Advanced human-system interface design review guidelines*. Brookhaven National Lab., Upton, NY (USA). Retrieved from http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:22029303
- Orchanian, L. C., Smahel, T. P., Howie, D. E., & Vicente, K. J. (1996). *DURESS II user's manual: A thermal-hydraulic process simulator for research and teaching*. Toronto: University of Toronto Press. Retrieved from <http://cel.mie.utoronto.ca/wp-content/uploads/CEL96-05.pdf>
- Park, Y. H., & Myung, R. (2012). A Study on Ecological Interface Design for Navy Ship's Radar Display. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 31(2), 353–362.
- Paterno, F., Santoro, C., Mantyjarvi, J., Mori, G., & Sansone, S. (2008). Authoring pervasive multimodal user interfaces. *International Journal of Web Engineering and Technology*, 4(2), 235–261.

- Paulsen, J. L. (1992). A pipe reactor design and the interface system. *Roskilde, Denmark: Sys Tems Analysis Department, Risø National Laboratory*.
- Pawlak, W. S., & Vicente, K. J. (1996). Inducing effective operator control through ecological interface design. *International Journal of Human-Computer Studies*, 44(5), 653–688.
- Pejtersen, A. M. (1992). New model for multimedia interfaces to online public access catalogues. *The Electronic Library*, 10(6), 359–366.
- Pomerantz, J. R., & Schwaitsberg, S. D. (1975). Grouping by proximity: Selective attention measures. *Perception & Psychophysics*, 18(5), 355–361.
- Ponsa, P., & Díaz, M. (2007). Creation of an ergonomic guideline for supervisory control interface design. In *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (pp. 137–146). Springer. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-73331-7_15
- Potter, S. S., Elm, W. C., Roth, E. M., Gualtieri, J. W., & Easter, J. R. (2002). Using intermediate design artifacts to bridge the gap between cognitive analysis and cognitive engineering. *Cognitive Systems Engineering in Military Aviation Environments: Avoiding Cogminutia Fragmentosa*, 137–168.
- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decisionmaking and system management. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15(2), 234 – 243. <http://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313353>
- Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human-Machine Interaction. An Approach to Cognitive Engineering*. Retrieved from <http://www.citeulike.org/group/1480/article/794973>
- Rasmussen, J., Pejtersen, A. M., & Goodstein, L. P. (1994). *Cognitive systems engineering*. John Wiley & Sons, Inc. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=179248>
- Read, G. J., Salmon, P. M., & Lenné, M. G. (2015). Cognitive work analysis and design: current practice and future practitioner requirements. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 16(2), 154–173.
- Rechard, J., Bignon, A., Berruet, P., & Morineau, T. (2015). Verification and validation of a Work Domain Analysis with turing machine task analysis. *Applied Ergonomics*, 47, 265–273.
- Robinson, S. (1997). Simulation model verification and validation: increasing the users' confidence. In *Proceedings of the 29th conference on Winter simulation* (pp. 53–59). IEEE Computer Society. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=268448>
- Rouse, W. B. (1983). Models of human problem solving: Detection, diagnosis, and compensation for system failures. *Automatica*, 19(6), 613–625.
- Rubinstein, E. (1979). The accident that shouldn't have happened: A narrative account of what is believed to have occurred, based on reports from many experts. *Spectrum, IEEE*, 16(11), 33–33.
- Rykiel, E. J. (1996). Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling*, 90(3), 229–244.
- Salas, E., Prince, C., Baker, D. P., & Shrestha, L. (1995). Situation awareness in team performance: Implications for measurement and training. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 123–136.
- Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, 7(1), 12–24.

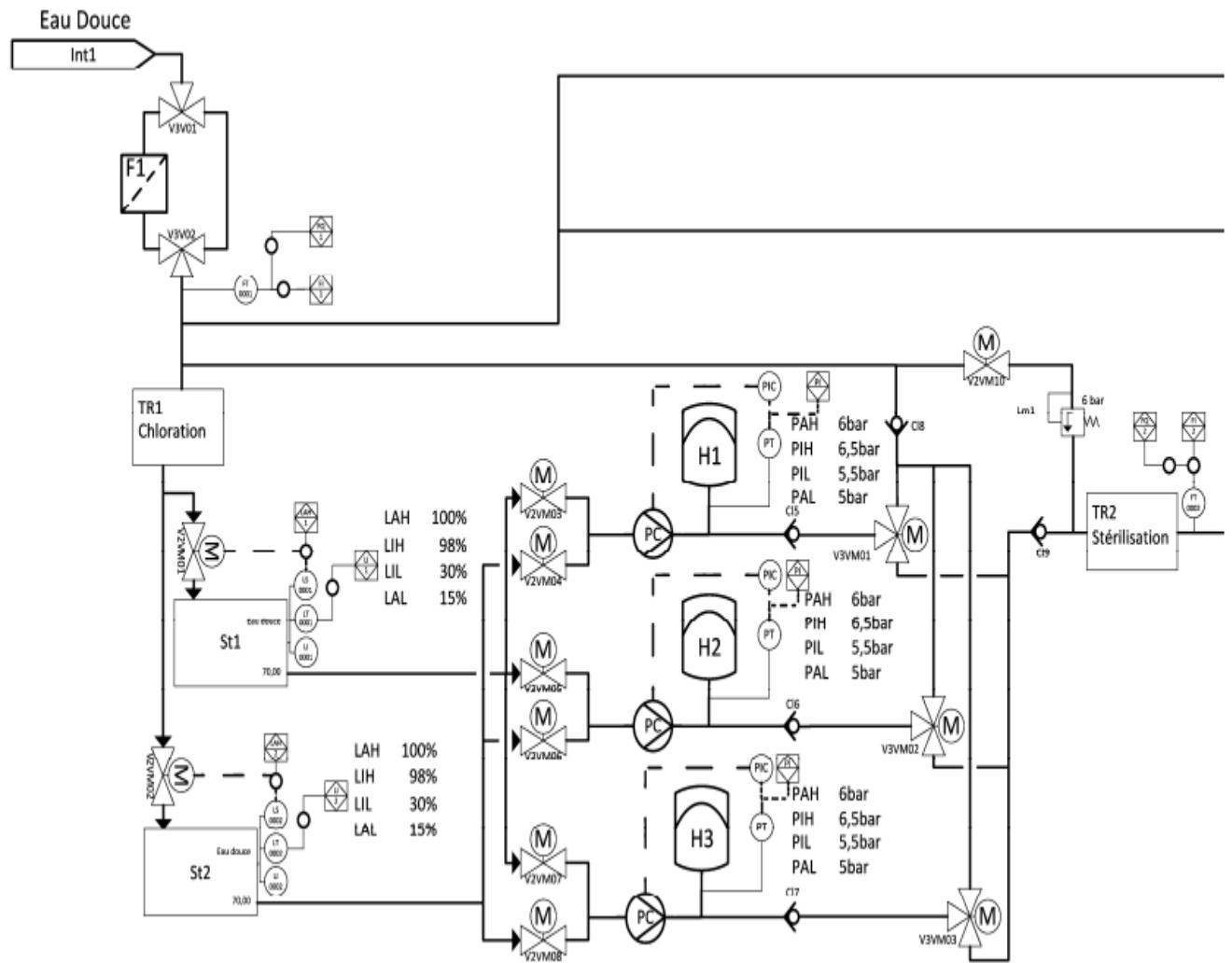
- Scapin, D. L., & Bastien, J. C. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour & Information Technology*, 16(4-5), 220–231.
- Scapin, D. L., & Bastien, J. M. C. (2001). Analyse des tâches et aide ergonomique à la conception: l'approche MAD*. *Analyse et Conception de l'IHM, Interaction Homme-Machine Pour Les Systèmes d'Information*, 1, 85–116.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84(1), 1.
- Shneiderman, B. (1982). The future of interactive systems and the emergence of direct manipulation†. *Behaviour & Information Technology*, 1(3), 237–256.
- Shneiderman, B. (1992). *Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction* (Vol. 2). Addison-Wesley Reading, MA. Retrieved from <http://tocs.ulb.tu-darmstadt.de/9800522.pdf>
- Skilton, W., Cameron, S., & Sanderson, P. (1998). Supporting cognitive work analysis with the Work Domain Analysis Workbench (WDAW). In *Computer Human Interaction Conference, 1998. Proceedings. 1998 Australasian* (pp. 260–267). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=732223
- Smith, S. L., & Mosier, J. N. (1986). *Guidelines for designing user interface software*. Mitre Corporation Bedford, MA. Retrieved from http://wireframe.vn/Books/Usability/Smith_Mosier_guideline_.pdf
- So, S., & Smith, M. (2002). Colour graphics and task complexity in multivariate decision making. *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, 15(4), 565–593.
- St-Cyr, O., Jamieson, G. A., & Vicente, K. J. (2013). Ecological interface design and sensor noise. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71(11), 1056–1068.
- Stoner, H. A., Wiese, E. E., & Lee, J. D. (2003). Applying ecological interface design to the driving domain: the results of an abstraction hierarchy analysis. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 47, pp. 444–448). SAGE Publications. Retrieved from <http://pro.sagepub.com/content/47/3/444.short>
- Sukaviriya, P., Foley, J. D., & Griffith, T. (1993). A second generation user interface design environment: The model and the runtime architecture. In *Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 375–382). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=169299>
- Sweller, J. (2002). Visualisation and instructional design. In *Proceedings of the International Workshop on Dynamic Visualizations and Learning* (pp. 1501–1510). Retrieved from <http://sites.google.com/site/polkas33/sweller.pdf>
- Szekely, P. A., Sukaviriya, P. N., Castells, P., Muthukumarasamy, J., & Salcher, E. (1995). Declarative interface models for user interface construction tools: the MASTERMIND approach. In *EHCI* (pp. 120–150). Retrieved from http://www.researchgate.net/profile/Pedro_Szekely/publication/220781012_Declarative_interface_models_for_user_interface_construction_tools_the_MASTERMIND_approach/links/02e7e53c6a8d7502d4000000.pdf
- Szekely, P., Luo, P., & Neches, R. (1992). Facilitating the exploration of interface design alternatives: the HUMANOID model of interface design. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 507–515). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=142912>

- Tan, W., Liu, D., & Bishu, R. (2009). Web evaluation: Heuristic evaluation vs. user testing. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(4), 621–627.
- Terrier, P., Cellier, J.-M., & Carreras, O. (2001). Un cadre théorique pour la conception d'interfaces: les interfaces écologiques. *Psychologie Française*, 46(2), 153–165.
- Tufte, E. R., & Graves-Morris, P. R. (1983). *The visual display of quantitative information* (Vol. 2). Graphics press Cheshire, CT. Retrieved from http://www.humanities.ufl.edu/pdf/tufte-aesthetics_and_technique.pdf
- Upton, C., & Doherty, G. (2008). Extending Ecological Interface Design principles: A manufacturing case study. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(4), 271–286.
- Van Elslande, P., Jaffard, M., Fouquet, K., & Vatonne, V. (2008). Variety of attentional failures in traffic accidents. In *Proceedings of the 15th European conference on Cognitive ergonomics: the ergonomics of cool interaction* (p. 9). ACM. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1473030>
- Vicente, K. J. (1999). *Cognitive work analysis: Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. CRC Press. Retrieved from http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=2IJHL_ZmsGoC&oi=fnd&pg=PP1&dq=why+work+analysis+an+ecological+perspective&ots=kVh0RxNbfG&sig=EcFcQxG4WnLggjZ6ZsrNJ_9KIGA
- Vicente, K. J. (2002). Ecological interface design: Progress and challenges. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(1), 62–78.
- Vicente, K. J., Christoffersen, K., & Perekhita, A. (1995). Supporting operator problem solving through ecological interface design. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 25(4), 529–545. <http://doi.org/10.1109/21.370186>
- Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1990). The ecology of human-machine systems II: Mediating direct perception in complex work domains. *Ecological Psychology*, 2(3), 207–249.
- Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1992). Ecological interface design: Theoretical foundations. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 22(4), 589–606.
- Vicente, K., & Pawlak, W. (1994). Cognitive work analysis for the DURESS II system. *Cognitive Engineering Laboratory, Department of Industrial Engineering, Toronto, Canada CEL*, 94–93.
- Watson, M. O., & Sanderson, P. M. (2007). Designing for attention with sound: challenges and extensions to ecological interface design. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(2), 331–346.
- Wells, A. J. (2002). Gibson's affordances and Turing's theory of computation. *Ecological Psychology*, 14(3), 140–180.
- Wickens, C. D., & Carswell, C. M. (1995). The proximity compatibility principle: its psychological foundation and relevance to display design. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(3), 473–494.
- Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). Attention, time-sharing, and workload. *Engineering Psychology and Human Performance*, 439–479.
- Woods, D. D. (1984). Visual momentum: a concept to improve the cognitive coupling of person and computer. *International Journal of Man-Machine Studies*, 21(3), 229–244.
- Young, M. S., & Birrell, S. A. (2012). Ecological interface design for eco-driving. Retrieved from <http://wrap.warwick.ac.uk/53217>

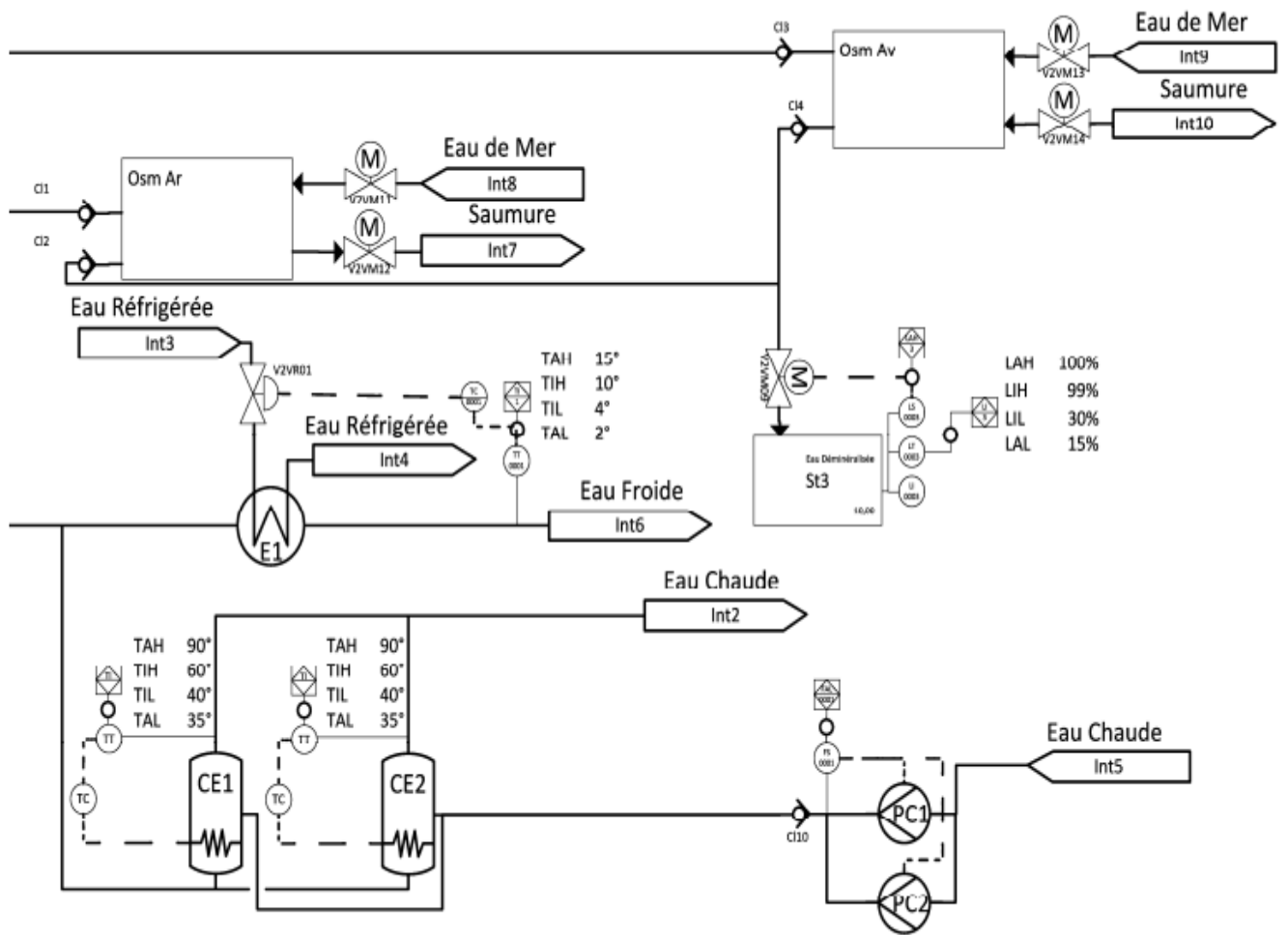
- Yu, X., Lau, E., Vicente, K. J., & Carter, M. W. (1998). Advancing performance measurement in cognitive engineering: The abstraction hierarchy as a framework for dynamical systems analysis. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 42, pp. 359–363). SAGE Publications. Retrieved from <http://pro.sagepub.com/content/42/3/359.short>
- Zaff, B. S. (1995). Designing with affordances in mind. *Global Perspectives on the Ecology of Human-Machine Systems*, 1, 121–156.

Annexe

Annexe 1 : Synoptique système EDS	176
Annexe 2 : Synoptique système EDS	177
Annexe 3 : Autorisation d'enregistrement.....	178
Annexe 4 : Questionnaires de vérification des connaissances de l'interface	179
Annexe 5 : Guide d'entretien	180
Annexe 6 : Consigne passation.....	181
Annexe 7 : Gedis partie 1	182
Annexe 8 : Gedis partie 2	183
Annexe 9 : Matrice cheminement cognitif Sujet 1.....	184
Annexe 10 : Matrice cheminement cognitive sujet 2	185
Annexe 11 : Matrice cheminement cognitif sujet 3.....	186
Annexe 12 : Matrice cheminement cognitif sujet 4.....	187
Annexe 13 : Matrice cheminement cognitif sujet 5.....	188
Annexe 14 : Matrice cheminement cognitif sujet 6.....	189
Annexe 15 : Matrice cheminement cognitif sujet 7.....	190
Annexe 16 : Matrice cheminement cognitif sujet 8.....	191
Annexe 17 : Matrice cheminement cognitif sujet 9.....	192
Annexe 18 : Matrice cheminement cognitif sujet 10.....	193
Annexe 19 : Matrice cheminement cognitif sujet 11.....	194
Annexe 20 : Matrice cheminement cognitif sujet 12.....	195
Annexe 21 : Matrice cheminement cognitif sujet 13.....	196
Annexe 22 : Matrice cheminement cognitif sujet 14.....	197



Annexe 1 : Synoptique système EDS



Annexe 2 : Synoptique système EDS



AUTORISATION D'ENREGISTREMENT

- Nous allons procéder à une expérimentation de 3 heures maximum.
- Cette expérimentation est libre et les participants sont bénévoles.
- Les verbalisations durant la passation doivent être enregistrées afin de faciliter leurs analyses.
- Nous certifions que l'enregistrement restera anonyme, confidentiel, et que nous l'exploiterons uniquement dans le cadre de notre étude.
- L'enregistrement sera conservé un an, puis supprimé.
- Le participant s'engage à la confidentialité des éléments qui pourraient lui être présentés.

Responsable de l'expérimentation	Participant
Nom :	Nom :
Prénom :	Prénom :
Signature :	Signature :

Annexe 3 : Autorisation d'enregistrement

Questionnaires de vérification des connaissances de l'interface

- Pouvez-vous m'indiquer sur l'interface qu'elle est la figure représentant les échanges de chaleur au niveau de la chaudière 1 puis des échangeurs thermiques ? Pouvez-vous m'expliquer ces deux représentations ?
- Pouvez-vous me montrer la soute numéro 3 et me montrer où l'on retrouve l'information du débit entrant ?
- Pouvez-vous me décrire la figure en forme de triangle et me l'expliquer ?
- Pouvez m'expliquer en vous servant des représentations graphiques à l'écran le fonctionnement du système d'eau douce sanitaire en commençant de la production jusqu'à la distribution ?

Annexe 4 : Questionnaires de vérification des connaissances de l'interface

GUIDE D'ENTRETIEN

Après chaque scénario :

A) Général :

- 1) Pouvez-vous me résumer brièvement la situation à laquelle vous venez d'être confronté ?
- 2) Selon vous, cette situation était-elle difficile à gérer ? Si oui / si non pourquoi ?
- 3) Avez-vous déjà rencontré ce type de situation dans votre activité ?

B) Si scénario résolu après ou avant l'alarme :

- 4) Quels sont les éléments de l'interface qui vous ont permis de détecter l'événement ?
- 5) Quels sont les éléments de l'interface qui vous ont permis de comprendre l'événement ?
- 6) Quels sont les éléments de l'interface qui vous ont permis de régler l'événement ?
- 7) Selon vous, y a-t-il une information, ici manquante, qui vous aurait permis de détecter plus rapidement la situation avant que l'alarme ne se déclenche ?

C) Si scénario résolu après l'alarme :

- 8) Selon vous, y a-t-il une information, ici manquante, qui vous aurait permis de comprendre et régler plus rapidement la situation après que l'alarme ne se soit déclenchée ?

D) Si scénario non résolu :

- 9) Pourquoi, selon vous, l'événement n'était pas facile à détecter ?
- 10) Pourquoi, selon vous, l'événement n'était pas facile à comprendre ?
- 11) Pourquoi, selon vous, l'événement n'était pas facile à régler ?
- 12) Selon vous, y a-t-il une information, ici manquante, qui vous aurait permis de détecter, comprendre et régler la situation ?

Après la passation complète :

Général

- 1) Comment cette passation s'est-elle déroulée ?
- 2) Sur une échelle de 1 à 10, avec 1 « très facile » à 10 « très compliqué », où placeriez-vous le niveau de difficulté des événements rencontrés et pourquoi ?
- 3) En quoi l'interface vous a-t-elle permis de déceler des éléments précurseurs à une alarme ?
- 4) Quels sont les éléments qui vous ont manqué pour déceler tous les éléments précurseurs à une alarme ?
- 5) En quoi selon vous, l'interface vous a-t-elle soutenu dans la résolution des situations rencontrées ?
- 6) En quoi selon vous, l'interface peut-elle être la cause de certaines difficultés à résoudre le problème ?
- 7) En quoi cette interface est différente des interfaces que vous utilisez habituellement ?
- 8) Que vous apporte-t-elle de plus / de moins ?
- 9) Selon vous, comment cette interface pourrait-elle être améliorée ?

Groupe Nouvelle interface

Vous n'avez pas été tous confrontés à la même interface. Voici l'autre. Comme vous pouvez le voir il y a certaines différences, telle que l'absence des représentations visuelles.

- 1) Pouvez-vous nous donner votre avis sur cette interface ?
- 2) Selon vous, auriez-vous eu plus de facilité ou de difficulté avec cette interface ? Et pourquoi ?

Groupe Ancienne interface

Vous n'avez pas été tous confrontés à la même interface. Voici l'autre. Comme vous pouvez le voir il y a certaines différences, telles que des informations supplémentaires.

- 1) Pouvez-vous nous donner votre avis sur cette interface ?
- 2) Selon vous, auriez-vous eu plus de facilité ou de difficulté avec cette interface ? Et pourquoi ?

Général

- Présentation des représentations visuelles. Pour chaque représentation il est demandé à l'opérateur :
- 1) Pensez-vous que cette représentation est nécessaire ? Pourquoi ?
 - 2) Que peut-elle vous apporter ?
 - 3) Comment pourriez-vous l'améliorer ?
 - 4) Globalement, avez-vous des remarques sur l'interface ? Des points à améliorer, à modifier... ?

Annexe 5 : Guide d'entretien

PASSATION DES SCENARIOS

CONSIGNE

« Bonjour et merci d'avoir accepté de participer à cette expérimentation.

Notre objectif est d'évaluer cette interface. Pour cela vous allez être confronté à différentes situations.

L'intérêt sera de voir si l'interface vous permet d'avoir les bonnes réactions au bon moment.

Ainsi ce n'est pas vous que nous évaluons mais l'interface.

La consigne est la suivante : vous devez vous assurer du bon fonctionnement du système d'eau douce sanitaire.

Vous devez immédiatement nous prévenir lorsque :

- Vous décelez un problème

- Vous trouvez la cause du problème

- Vous trouvez la solution au problème.

Ainsi nous vous demandons de dire à haute voix toutes les actions ou réflexions que vous avez.

Durant la passation, nous vous demanderons régulièrement de répondre à un questionnaire et à quelques questions entre chaque situation.

A la fin de la passation, un entretien nous permettra de revenir ensemble sur le déroulement de l'expérimentation.

Pour le bien de notre étude et le traitement de nos résultats, nous devons vous enregistrer. Nous vous assurons par ce document (feuille d'autorisation) que ces enregistrements resteront confidentiels et ne seront utilisés que pour le bien de notre étude.

Avez-vous des questions ? »

PASSATION

« Etes-vous prêt ? »

Lancement de l'enregistrement.

Lancement du scénario et du chronomètre.

1) Phase de détection

→ L'opérateur doit visualiser la situation, déceler et comprendre le problème, et agir en conséquence avant que l'alarme ne se déclenche.

Si le problème a été détecté et résolu avant que l'alarme ne se déclenche : Entretien post scénario : a) + b).

Si le problème n'a pas été résolu avant que l'alarme se déclenche (même si il a été détecté) : Entretien post scénario : a) + d) + ALARME !

2) Phase de résolution de l'alarme (seulement si la phase de détection a échoué)

→ L'opérateur doit trouver la cause de l'alarme et agir en conséquence pour régler le problème.

Si le problème a été résolu après alarme : Entretien post scénario : a) + b) + c)

Si le problème n'a pas été résolu après alarme :

La bonne réponse est donnée à l'opérateur : Entretien post scénario : a) + d)

→ Il en est de même pour tous les scénarios.

3) Entretien Post Test final : Retour sur la passation avec l'opérateur.

Table 1. GEDIS guide indicators (part one)

Name of indicator	Numeric qualitative range	
Architecture		
Map existence	[YES, NO]	[5,0]
Number of levels le	[le<4, le>4]	[5,0]
Division: plant, area, subarea, team	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Distribution		
Model comparison	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Flow process	[clear, med, no clear]	[5, 3, 0]
Density	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Navigation		
Relationship with architecture	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Navig. Between screens	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Color		
Absence of non appropriate combinations	[YES, NO]	[5,0]
Color number c	[4<c<7, c>7]	[5, 0]
Blink absence (no alarm situation)	[YES, NO]	[5,0]
Contrast screen versus graphical objects	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Relationship with text	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Text font		
Font number f	[f<4, f>4]	[5, 0]
Absence of small font (smaller 8)	[YES, NO]	[5,0]
Absence of non appropriate combinations	[YES, NO]	[5,0]
Abbreviation use	[app, med, no app]	[5, 3, 0]

where, app= appropriate, med= medium and no app= no appropriate.

Annexe 7 : Gedis partie 1

Table 2. GEDIS guide indicators (part two)

Name of indicator	Numeric qualitative range	
Status of the devices		
Uniform icons and symbols	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Status team representativeness	[YES, NO]	[5,0]
Process values		
Visibility	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Location	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Graphs and tables		
Format	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Visibility	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Location	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Grouping		
Data-entry commands		
Visibility	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Usability	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Feedback	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Alarms		
Visibility of alarm window	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Location	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Situation awareness	[YES, NO]	[5,0]
Alarms grouping	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Information to the operator	[app, med, no app]	[5, 3, 0]
Information to the operator	[app, med, no app]	[5, 3, 0]

where, app= appropriate, med= medium and no app= no appropriate.

Annexe 8 : Gedis partie 2

Sujet Allereau : condition PID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1 1-1-1 1-1		1 1	8
Fonction généralisée					
Fonction physique		1		1 1	3
Total liens entrant		7		4	11

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 9 : Matrice cheminement cognitif Sujet 1

Sujet Boutin : condition EID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1	1 1 1 1	1 1 1	6
Fonction généralisée				1	1
Fonction physique		1		1	2
Total liens entrant		2	3	4	9

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 10 : Matrice cheminement cognitive sujet 2

Sujet Caret : condition EID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					0
Fonction abstraite			1-1 1 1 1 1		5
Fonction généralisée				1 1 1 1 1	4
Fonction physique					0
Total liens entrant	0	0	5	4	9

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 11 : Matrice cheminement cognitif sujet 3

Sujet Danguy : condition PID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite			1-1	1	3
Fonction généralisée		1	1	1-1 1 1 1 1	7
Fonction physique		1	1 1		3
Total liens entrant		2	5	6	13

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 12 : matrice cheminement cognitif sujet 4

Sujet De Penfenteyo : condition EID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1	1 1 1 1	1	5
Fonction généralisée			1	1 1	3
Fonction physique					
Total liens entrant		1	4	3	8

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 13 : Matrice cheminement cognitif sujet 5

Sujet Debled : condition PID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1 1		1 1-1 1-1 1	8
Fonction généralisée					
Fonction physique		1-1 1-1	1-1		6
Total liens entrant		6	2	6	14

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 14 : matrice cheminement cognitif sujet 6

Sujet Feuille : condition PID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1 1 1-1 1-1	1	1 1-1	10
Fonction généralisée		1		1	2
Fonction physique		1 1		1	3
Total liens entrant		9	1	5	15

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 15 : matrice cheminement cognitif sujet 7

Sujet Forgues : condition PID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1-1 1	1	1 1 1-1	8
Fonction généralisée				1	1
Fonction physique		1-1			2
Total liens entrant		5	1	5	11

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 16 : matrice cheminement cognitif sujet 8

Sujet Rillois : condition PID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1 1		1 1 1 1	5
Fonction généralisée			1	1 1	3
Fonction physique		1 1 1-1-1 1-1-1	1		9
Total liens entrant		10	2	5	17

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 17 : matrice cheminement cognitif sujet 9

Sujet Buxman : condition EID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1-1 1	1 1	1	6
Fonction généralisée				1-1 1	3
Fonction physique			1 1 1 1		4
Total liens entrant		3	6	4	13

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 18 : matrice cheminement cognitif sujet 10

Sujet Cariou : condition EID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1 1-1 1 1	1 1 1 1	1-1 1 1	10
Fonction généralisée				1 1 1	2
Fonction physique		1		1	2
Total liens entrant		5	3	6	14

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 19 : matrice cheminement cognitif sujet 11

Sujet Chiffolleau : condition EID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1	1 1	1	4
Fonction généralisée			1-1-1 1	1 1 1 1	7
Fonction physique				1	1
Total liens entrant		1	6	5	12

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 20 : matrice cheminement cognitif sujet 12

Sujet CHOTARD : condition EID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1	1 1 1 1-1	1 1 1	7
Fonction généralisée			1	1 1-1 1-1	6
Fonction physique		1	1	1	3
Total liens entrant		2	6	8	16

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 21 : matrice cheminement cognitif sujet 13

Sujet Thomas : condition PID

	Objectif fonctionnel	Fonction abstraite	Fonction généralisée	Fonction physique	Total liens sortant
Objectif fonctionnel					
Fonction abstraite		1	1 1 1 1-1		6
Fonction généralisée				1 1 1-1-1 1-1	7
Fonction physique					
Total liens entrant		1	5	7	13

1 : lien dans le scénario 1
1 : lien dans le scénario 2
1 : lien dans le scénario 3
1 : lien dans le scénario 4

Annexe 22 : matrice cheminement cognitif sujet 14

Introduction de critères ergonomiques dans un système de génération automatique d'interface de supervision

La conception d'interface écologique se décompose en deux étapes, une analyse du domaine de travail et une retranscription des informations du domaine de travail en des représentations écologiques (Naikar, 2010). Ce type de conception a montré son efficacité pour la supervision de système complexe (Burns, 2008). Cependant, Vicente (2002) a pointé deux lacunes principales, le temps de conception très long et la difficulté à transcrire de manière formalisée un domaine de travail en un ensemble de représentations écologiques. De même, il n'existe pas d'outil formel de validation de domaine de travail. La littérature ne propose pas de solutions concrètes néanmoins des pistes comme la méthodologie de traduction d'un domaine de travail en représentations graphiques proposée par Liu et al (2002), l'outil TMTA sur la simulation d'une tâche dans un domaine de travail (Morineau, 2010), et le flot de conception semi-automatisé Anaxagore (Bignon, 2012), permettent d'être confiant sur la possibilité de trouver des solutions.

Dans ce manuscrit, nous proposons plusieurs réponses à la question : comment formaliser la conception d'une interface écologique, afin de réduire le temps et les efforts liés à la conception ? La première proposition est un outil de vérification de modèle de domaine de travail sur la base d'une simulation par TMTA. La seconde apporte, au travers d'une deuxième version du flot Anaxagore, une intégration des travaux de Liu et al (2002) avec le principe d'une bibliothèque de widgets écologiques associée à un schéma d'entrées de haut niveau. Sur la base du domaine de travail d'un système d'eau douce sanitaire à bord d'un navire, une interface écologique a été implémentée et validée expérimentalement. Cette interface a été comparée avec une interface conventionnelle générée également par le flot Anaxagore. Les résultats montrent que les interfaces écologiques favorisent un plus grand nombre de parcours cohérents dans un domaine de travail. Elles favorisent également une meilleure précision du diagnostic pour les opérateurs utilisant les interfaces écologiques.

Mots clés : Conception écologique d'interface, IHM, Supervision, génération automatique